

ANDRÉ FRANSOLIN ROLLO

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA QUALIDADE DO AR INTERIOR EM
AMBIENTES CLIMATIZADOS ANALISANDO PARÂMETROS E SUAS
CORRELAÇÕES**

São Paulo

2024

ANDRÉ FRANSOLIN ROLLO

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA QUALIDADE DO AR INTERIOR EM
AMBIENTES CLIMATIZADOS ANALISANDO PARÂMETROS E SUAS
CORRELAÇÕES**

Versão Corrigida

(Versão original encontra-se na unidade que aloja o Programa de Pós-Graduação)

Dissertação apresentada para a Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia Mecânica de
Energia e Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Marcos de Mattos
Pimenta

Co-orientador: Prof. Dr. Antonio Luís de
Campos Mariani

São Paulo

2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 12 de janeiro de 2024

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catlogação-na-publicação

Rollo, Andre Fransolin

Estudo experimental da qualidade do ar interior em ambientes climatizados analisando parâmetros e suas correlações / A. F. Rollo -- versão corr. -- São Paulo, 2024.

261 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Qualidade do ar interior 2.Contaminantes 3.Ar condicionado 4.Ambientes de ensino 5.Correlações I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, avós e a toda minha família, pelo amor e carinho com que sempre me apoiaram e incentivaram.

Dedico este trabalho também a todos os meus professores, do ensino básico ao mestrado, que, cada um da sua maneira, contribuíram para a minha formação como pessoa e profissional.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo ensino da valorização do conhecimento e pelo suporte, apoio e incentivo ao longo de toda a minha trajetória.

Ao Prof. Dr. Antonio Luís de Campos Mariani, pela parceria, orientação, incentivo e apoio incansáveis desde meu trabalho de conclusão de curso da graduação, ao longo de todo o curso de mestrado e durante as atividades de medição desenvolvidas.

Ao Prof. Dr. Marcos de Mattos Pimenta, pela confiança, apoio e orientação durante o processo de execução do presente trabalho.

Ao colega de curso, Eng. Sergio Guilhotti, pelo apoio e parceria no projeto do LEQAI.

Ao Eng. José Carlos Felamingo, pelos ensinamentos e orientação ao longo do início de minha trajetória profissional e acadêmica na engenharia.

À toda a equipe da Union Rhac Tecnologia em Eficiência Energética, pelo apoio e suporte ao longo da realização do curso de mestrado.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pelo apoio e disponibilização da estrutura e locais para a realização das atividades de medição desenvolvidas.

À equipe do Laboratório de Estudo da Qualidade do Ar de Interiores (LEQAI), pela parceria e apoio durante a execução das atividades de medições.

Às equipes do Programa Poli Cidadã e do Centro Acadêmico da Mecânica e Mecatrônica, pela organização e disponibilização dos eventos para realização das medições.

À empresa Omni Eletrônica, pelo apoio e disponibilização dos equipamentos de medição contínua de parâmetros da qualidade do ar utilizados durante os experimentos.

À empresa Conforlab Engenharia Ambiental, pela disponibilização dos instrumentos de medição e apoio durante a realização dos experimentos.

À empresa Multivac, pela disponibilização dos equipamentos de ventilação e filtros utilizados durante os experimentos.

RESUMO

Assunto de extrema relevância no que concerne à saúde e ao bem-estar dos ocupantes de uma edificação, a qualidade do ar interior apresenta-se como tema sob crescente foco na sociedade e na área de AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado). Com a pandemia do coronavírus (COVID-19), a questão da qualidade do ar que se respira nos ambientes fechados ganhou ainda mais relevância.

Em instituições acadêmicas, além dos aspectos relacionados à saúde e ao bem-estar dos ocupantes, estudos apontam que a qualidade do ar e as condições de conforto térmico nas salas de aula promovem um impacto direto na capacidade de aprendizado e no desempenho acadêmico dos estudantes, além de contribuir com a redução da taxa de abstenções.

Este trabalho estuda o comportamento de parâmetros que definem a Qualidade do Ar Interior (QAI), incluindo dióxido de carbono (CO_2), materiais particulados (PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$), agentes biológicos (fungos viáveis), além de propriedades psicrométricas, como temperatura e umidade relativa. Os conjuntos de parâmetros foram monitorados em ensaios realizados nas instalações da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

O estudo do comportamento das grandezas selecionadas foi parametrizado de modo a se obter as possíveis correlações entre elas, por meio do cálculo do coeficiente de correlação linear, destacando-se a avaliação das influências ocasionadas pela taxa de renovação, classes de filtragem e tipo de atividade desempenhada pelos ocupantes. As correlações obtidas permitem analisar a influência de um parâmetro em relação aos demais e às variáveis de projeto.

Com base nos dados obtidos, os fatores que influenciaram significativamente a concentração de CO_2 no ar interno foram o número de ocupantes (correlação positiva $R=0,71$) e a taxa de renovação (correlação negativa $R=-0,47$). Em relação aos particulados, sua concentração teve menor sensibilidade à vazão de ar externo ($R=-0,27$), com grande coeficiente de correlação entre suas concentrações nas áreas interna e externa ($R=0,73$), sendo parâmetros críticos nos tipos de eventos monitorados. Quanto aos fungos viáveis, houve uma correlação alta ($R=0,83$) no primeiro ensaio com os particulados finos ($\text{PM}_{2,5}$). Porém, no conjunto dos dois ensaios, a correlação com os particulados grossos (PM_{10}) foi a mais constante ($R=0,48$ e $R=0,32$).

Palavras-chave: Qualidade do ar interior, contaminantes, ar condicionado, ambientes de ensino, correlações.

ABSTRACT

A matter of extreme relevance to the health and well-being of the occupants of a building, indoor air quality presents itself as a topic under increasing focus in the society and HVAC area (Heating, Ventilation and Air Conditioning). With the coronavirus pandemic (COVID-19), the issue of the quality of air breathed in indoor environments has gained even more relevance.

In academic institutions, in addition to the aspects related to the health and well-being of the occupants, studies indicate that air quality and thermal comfort conditions in classrooms have a direct impact on students' learning ability and academic performance, contributing also to the reduction of the absenteeism rate.

This paper studies the behavior of parameters that define Indoor Air Quality (IAQ), including carbon dioxide (CO₂), particulate matters (PM₁₀ and PM_{2.5}), biological agents (viable fungi) and psychrometric properties, such as air temperature and relative humidity. The sets of parameters were monitored through tests carried out in the facilities of the Polytechnic School of the University of São Paulo (EPUSP).

The study of the behavior of the selected quantities was parameterized to obtain the correlations between them, by calculating the linear correlation coefficient, highlighting the evaluation of the influences of the renewal air rate, filter classes and type of activity performed by the occupants. The calculated correlations contribute to analyze the influence of one parameter in relation to the others and to the design variables.

Based on the results obtained, the factors which significantly influenced the concentration of CO₂ in the indoor air were the number of occupants (positive correlation $R=0.71$) and the renewal air rate (negative correlation $R=-0.47$). In relation to the particulate matters, its concentration showed lower sensitivity to renewal air rate ($R=-0.27$), with a high correlation coefficient between their concentrations in internal and external areas ($R=0.73$), being critical parameters in the monitored events. Regarding the viable fungi, a high correlation ($R=0.83$) was observed in the first test with fine particulates (PM_{2.5}). However, across the two tests, the correlation with coarse particulates (PM₁₀) was the most constant ($R=0.48$ e $R=0.32$).

Keywords: Indoor air quality, contaminants, air conditioning, educational environment, correlations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Esquema da classificação dos materiais particulados e algumas de suas fontes (WHO, 2005).....	49
Figura 4.1: Vista aérea da localização das salas (fonte: google imagens).....	74
Figura 4.2: Vista de corte da Sala A2 (adaptado de Fakhoury, 2017).....	75
Figura 4.3: Planta da Sala A2 (adaptado de Fakhoury, 2017).....	75
Figura 4.4: Foto da Sala A2 em atividade da equipe do LEQAI, com os difusores ao fundo. 76	
Figura 4.5: Foto da Sala A2 em atividade da equipe do LEQAI, com unidades evaporadoras ao fundo.	76
Figura 4.6: Posicionamento dos instrumentos de medição no ar interior durante os eventos..	79
Figura 4.7: Posicionamento dos instrumentos de medição no ar externo durante os eventos..	79
Figura 4.8: Indicação dos pontos de medição e das estações de trabalho na Sala A2.....	82
Figura 4.9: Diagrama da sequência de pontos de medição para análise de estratificação.	82
Figura 4.10: Sequência de acionamento das caixas de renovação durante intervalo de almoço.	83
Figura 4.11: Trajeto do soprador e pontos de medição (VALENCIO E HERSCHANDER, 2021).....	85
Figura 4.12: Processo de varrição com pontos de medição (adaptado de Dante e Bisordi (2020)).	86
Figura 4.13: Indicação dos pontos de coleta para análise de fungos viáveis no interior da Sala A2.	87
Figura 4.14: Indicação do ponto de coleta para análise de fungos viáveis na área externa.	87
Figura 4.15: Aspectos das amostras de material biológico antes e após o período de incubação.	88
Figura 4.16: Processo de análise das amostras de material biológico (ARGENTON E PRADO, 2021).....	88
Figura 4.17: Sequência de operação e filtragem das caixas de renovação durante os ensaios.	89
Figura 4.18: Posicionamento dos pontos de medição no interior do ambiente.	91
Figura 4.19: Esquema do sistema de renovação de ar com a inclusão dos ventiladores auxiliares (ARGENTON E PRADO, 2021).	92
Figura 4.20: Exemplo de montagem da estação de medição utilizada nos experimentos.....	93

Figura 4.21: Imagem ilustrativa do medidor de CO ₂ utilizado nos ensaios (TESTO, 2022)...	95
Figura 4.22: Esquema simplificado do funcionamento do medidor de CO ₂ utilizando o princípio NDIR (MENDES et al. (2015).	96
Figura 4.23: Medição de particulados na área externa com o contador de partículas.....	97
Figura 4.24: Esquema interno de um contador de partículas (TSI, 2022).....	98
Figura 4.25: Ajuste das configurações de coleta de amostras no contador de partículas.....	98
Figura 4.26: Exemplo de leitura dos dados na tela gráfica contador de partículas.	100
Figura 4.30: Exemplo de instalação dos multimedidores de QAI na Sala A2.	102
Figura 4.28: Sistema de contagem de partículas através de multimedidor de QAI (SENSIRION, 2020).....	102
Figura 4.29: Esquema funcional de um multimedidor de QAI (SENSIRION, 2022).....	103
Figura 4.30: Exemplo de medição realizada com o medidor tipo coifa durante os ensaios...	105
Figura 4.31: Princípio de coleta no amostrador por impactação (DIAS, 2010).	106
Figura 4.32: Conjunto de coleta de bioaerossóis montado na Sala A2 durante os ensaios.	107
Figura 4.33: Estação meteorológica montada na área externa (VALENCIO E HERSCHANDER, 2021).	109
Figura 4.34: Pontos de medição meteorológica nos ensaios (adaptado de Argenton e Prado (2021)).	109
Figura 4.35: Medidor de distâncias utilizado no experimento (VALENCIO E HERSCHANDER, 2021).	110
Figura Ap.C.1: Exemplo de distribuição de partículas em número e em volume/massa (REHVA, 2011).	193
Figura Ap.E.1. Modelagem da Sala A2 para cálculo da concentração de particulados (Guilhotti, 2021).	201
Figura Ap.F.1: Fluxograma básico previsto para o sistema de climatização da Sala MT-16 do LEQAI (GUILHOTTI, 2021).....	204
Figura Ap.F.2: Fluxograma básico previsto para o sistema de climatização da Sala MT-06 do LEQAI (GUILHOTTI, 2021).....	204
Figura Ap.F.3: Fotos da casa de máquinas da Sala MT-16.....	205
Figura Ap.F.4: Fotos da casa de máquinas da Sala MT-06.....	205
Figura Ap.H.1: Exemplo de distribuição de probabilidades gaussiana (INMETRO, 2008). ..	212
Figura Ap.H.2: Exemplo de distribuição de probabilidades retangular (INMETRO, 2008). ..	213

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1: Eficiência de filtros MERV em função do tamanho das partículas (ASHRAE, 2022).....	60
Gráfico 3.2: Curvas de distribuição cumulativa média de massa por tamanho dos aerossóis para áreas urbanas e rurais (HEMERKA e VYBÍRAL, 2021).....	65
Gráfico 3.3: Evolução da taxa de ventilação mínima recomendada ao longo do tempo (JANSEN, 1999).....	67
Gráfico 4.1: Curva de operação das caixas de renovação de ar da Sala A2, com filtros G4+M5 (MULTIVAC, 2017).	77
Gráfico 4.2: Foto e curva de operação dos ventiladores auxiliares (adaptado de MULTIVAC, 2017).....	92
Gráfico 5.1: Variação da temperatura de bulbo seco durante a edição de 2016 da Oficina de Rolimã (baseado em dados de medições de Fakhoury (2017)).	117
Gráfico 5.2: Variação da temperatura de bulbo seco durante a edição de 2017 da Oficina de Rolimã (baseado em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).	118
Gráfico 5.3: Variação da temperatura de bulbo seco durante a edição de 2018 da Oficina de Rolimã.	118
Gráfico 5.4: Variação da umidade relativa durante a edição de 2016 da Oficina de Rolimã (baseado em dados de medições de Fakhoury (2017)).	119
Gráfico 5.5: Variação da umidade relativa durante a edição de 2017 da Oficina de Rolimã (baseado em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).	119
Gráfico 5.6: Variação da umidade relativa durante a edição de 2018 da Oficina de Rolimã.	120
Gráfico 5.7: Perfil A de variação da vazão de ar externo durante as edições da Oficina de Rolimã (curva de 2016 baseada em dados de medições de Fakhoury (2017)).	121
Gráfico 5.8: Perfil B de variação da vazão de ar externo durante as edições da Oficina de Rolimã (curva de 2016 baseada em dados de medições de Fakhoury (2017)).	121
Gráfico 5.9: Perfil C de variação da vazão de ar externo durante as edições da Oficina de Rolimã (baseado em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).	121
Gráfico 5.10: Variação da vazão de ar externo por ocupante para Perfil A de vazão (curva de 2016 baseada em dados de medições de Fakhoury (2017)).	122

Gráfico 5.11: Variação da vazão de ar externo por ocupante para Perfil B de vazão (curva de 2016 baseada em dados de medições de Fakhoury (2017)).	122
Gráfico 5.12: Variação da vazão de ar externo por ocupante para Perfil C de vazão (baseado em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).	122
Gráfico 5.13: Variação da concentração de CO ₂ durante a edição de 2016 da Oficina de Rolimã (baseado em dados de medições de Fakhoury (2017)).	123
Gráfico 5.14: Variação da concentração de CO ₂ durante a edição de 2017 da Oficina de Rolimã (baseado em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).	123
Gráfico 5.15: Variação da concentração de CO ₂ durante a edição de 2018 da Oficina de Rolimã.	124
Gráfico 5.16: Variação da concentração de PM ₁₀ durante a edição de 2016 da Oficina de Rolimã (baseado em dados de medições de Fakhoury (2017)).	125
Gráfico 5.17: Variação da concentração de PM ₁₀ durante a edição de 2017 da Oficina de Rolimã (baseado em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).	125
Gráfico 5.18: Variação da concentração de PM ₁₀ durante a edição de 2018 da Oficina de Rolimã.	126
Gráfico 5.19: Variação da concentração de PM _{2,5} durante a edição de 2016 da Oficina de Rolimã (baseado em dados de medições de Fakhoury (2017)).	127
Gráfico 5.20: Variação da concentração de PM _{2,5} durante a edição de 2017 da Oficina de Rolimã (baseado em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).	127
Gráfico 5.21: Variação da concentração de PM _{2,5} durante a edição de 2018 da Oficina de Rolimã.	128
Gráfico 5.22: Curvas de decaimento dos materiais particulados em comparação com o CO ₂ durante o período do almoço da Oficina de Rolimã de 2019 (DANTE & BISORDI, 2020).	129
Gráfico 5.23: Variação da temperatura de bulbo seco durante as edições de 2016 e 2017 da Oficina de Brinquedos (curvas de 2016 baseadas em dados de medições de Fakhoury (2017) e curvas de 2017 baseadas em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).	130
Gráfico 5.24: Variação da temperatura de bulbo seco durante as edições de 2018 e 2019 da Oficina de Brinquedos (curvas de 2018 baseadas em dados de medições de Guilhotti (2021)).	131
Gráfico 5.25: Variação da umidade relativa durante as edições de 2016 e 2017 da Oficina de Brinquedos (curvas de 2016 baseadas em dados de medições de Fakhoury (2017) e curvas de 2017 baseadas em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).	131

Gráfico 5.26: Variação da umidade relativa durante as edições de 2018 e 2019 da Oficina de Brinquedos (curvas de 2018 baseadas em dados de medições de Guilhotti (2021)).....	132
Gráfico 5.27: Variação da vazão de ar por ocupante durante as edições de 2016 e 2017 da Oficina de Brinquedos (curva de 2016 baseada em dados de medições de Fakhoury (2017) e curva de 2017 baseada em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).	133
Gráfico 5.28: Variação da vazão de ar por ocupante durante as edições de 2018 e 2019 da Oficina de Brinquedos (curva de 2018 baseada em dados de medições de Guilhotti (2021)).	133
Gráfico 5.29: Variação da concentração de CO ₂ durante as edições de 2016 e 2017 Oficina de Brinquedos (curvas de 2016 baseadas em dados de medições de Fakhoury (2017) e curvas de 2017 baseadas em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).	134
Gráfico 5.30: Variação da concentração de CO ₂ durante as edições de 2018 e 2019 Oficina de Brinquedos (curvas de 2018 baseadas em dados de medições de Guilhotti (2021)).....	134
Gráfico 5.31: Concentração de PM ₁₀ durante as edições de 2016 e 2017 da Oficina de Brinquedos (curvas de 2016 baseadas em dados de medições de Fakhoury (2017) e curvas de 2017 baseadas em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).	135
Gráfico 5.32: Concentração de PM ₁₀ durante as edições de 2018 e 2019 da Oficina de Brinquedos (curvas de 2018 baseadas em dados de medições de Guilhotti (2021)).....	136
Gráfico 5.33: Concentração de PM _{2,5} durante as edições de 2016 e 2017 da Oficina de Brinquedos (curvas de 2016 baseadas em dados de medições de Fakhoury (2017) e curvas de 2017 baseadas em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).	136
Gráfico 5.34: Concentração de PM _{2,5} durante as edições de 2018 e 2019 da Oficina de Brinquedos (curvas de 2018 baseadas em dados de medições de Guilhotti (2021)).....	137
Gráfico 5.35: Distância do varedor à tomada de ar da sala ao longo do experimento.	142
Gráfico 5.36: Velocidade e direção do vento ao longo do experimento.	142
Gráfico 5.37: Variação da temperatura de bulbo seco ao longo do experimento.....	143
Gráfico 5.38: Variação da umidade relativa ao longo do experimento.	143
Gráfico 5.39: Concentrações de dióxido de carbono (CO ₂) ao longo do experimento.	144
Gráfico 5.40: Concentrações de materiais particulados finos no ar externo ao longo do experimento.	145
Gráfico 5.41: Concentrações de materiais particulados finos no ar interior ao longo do experimento	145
Gráfico 5.42: Concentrações de materiais particulados grossos PM ₁₀ ao longo do experimento.	146

Gráfico 5.43: Concentrações de fungos viáveis totais ao longo do experimento.....	147
Gráfico 5.44: Concentrações de Cladosporium sp. ao longo do experimento.	147
Gráfico 5.45: Concentrações de Penicillium sp. ao longo do experimento.....	147
Gráfico 5.46: Concentrações de Não Esporulados ao longo do experimento.	148
Gráfico 5.47: Variação da temperatura de bulbo seco ao longo do experimento.....	154
Gráfico 5.48: Variação da umidade relativa ao longo do experimento.	154
Gráfico 5.49: Variação da vazão de ar externo ao longo do experimento.....	155
Gráfico 5.50: Variação da concentração de CO ₂ no ar interior ao longo do experimento.	156
Gráfico 5.51: Variação da concentração de particulados finos no ar externo ao longo do experimento.	157
Gráfico 5.52: Variação da concentração de particulados finos no ar interior ao longo do experimento.	158
Gráfico 5.53: Variação da concentração de particulados grossos PM ₁₀ ao longo do experimento.	159
Gráfico 5.54: Variação da concentração de fungos viáveis totais ao longo do experimento.	160
Gráfico Ap.A.1: Faixa aceitável de temperatura e velocidade do ar na zona de conforto (ASHRAE, 2010).	189
Gráfico Ap.B.1: Principais fontes de emissão de CO ₂ nos EUA em 2019 por setores (EPA, 2020).....	190
Gráfico Ap.B.2: Variação das emissões globais diárias de CO ₂ em relação à 2019 (JACKSON et al. (2022)).....	191
Gráfico Ap.B.3: Taxa de respiração, consumo de oxigênio e produção de CO ₂ em função do metabolismo (ASHRAE, 2013).....	191
Gráfico Ap.C.1: Distribuição típica de número, superfície e volume de particulados para (a) áreas urbanas e (b) áreas rurais (SEINFELD & PANDIS, 2016).....	192
Gráfico Ap.D.1: Desempenho dos estudantes em função da vazão de ar externo (WYON e WARGOCKI, 2009).....	196
Gráfico Ap.D.2: Desempenho dos estudantes em função da temperatura (WYON e WARGOCKI, 2009).....	196
Gráfico Ap.D.3: Absenteísmo dos estudantes em função da vazão de ar externo (MENDELL et al., 2013).....	198
Gráfico Ap.G.1: Fator de correção da vazão pela perda de carga do instrumento (SHORTRIDGE, 1990).	206

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: ΔCO_2 para pessoas não adaptadas em função do tipo de espaço (OLESEN et al., 2020).....	47
Tabela 3.2: Níveis recomendados (AQG) para os poluentes e metas intermediárias pelo guia de qualidade do ar da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2021).	51
Tabela 3.3: Níveis recomendados (AQG) para os poluentes e metas intermediárias pela Resolução Nº 491 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2018).	52
Tabela 3.4: Padrões de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2013).	53
Tabela 3.5: Classificação dos filtros conforme NBR 16101 (ABNT, 2012), baseada na EN 779 (CEN, 2012).	55
Tabela 3.6: Classes mínimas de filtração por aplicação estipuladas pela NBR 16401-3 (ABNT, 2008).....	56
Tabela 3.7: Classes mínimas de filtração recomendadas pela Norma EN 13779 (CEN, 2011).	57
Tabela 3.8: Classificação dos filtros de ar conforme ASHRAE 52.2 pelo MERV (ASHRAE, 2017).....	58
Tabela 3.9: Comparação aproximada entre classificações de filtros de ar pela NBR 16101 e ASHRAE 52.2 (AIRLINK, 2022).....	59
Tabela 3.10: Critérios de classificação do ar insuflado, conforme Norma EN 16798-3 (CEN, 2017).....	62
Tabela 3.11: Eficiências mínimas de filtração em função das condições do ar externo e do insuflamento dadas pela Norma EN 16798-3 (CEN, 2017).	62
Tabela 3.12: Exemplos de combinação de filtros para atender às eficiências mínimas recomendadas pela Norma EN 16798-3 (CEN, 2017).	63
Tabela 3.13: Classificação de filtros de acordo com a Norma ISO 16890 (adaptado de REHVA, 2021).....	64
Tabela 3.14: Comparativo da eficiência medida em ensaios com filtros certificados pela EN 779 (CEN, 2012) para os grupos da ISO 16890 (ISO, 2016) de particulados (EUROVENT, 2018).....	65
Tabela 3.15:Eficiências mínimas de filtração dadas pela Norma EN 16798-3 (CEN, 2017) atualizados para grupos da ISO 16890 (ISO, 2016) de particulados (EUROVENT, 2018).....	66

Tabela 3.16: Exemplos de combinação de filtros para atender às eficiências mínimas da Norma EN 16798-3 (CEN, 2017) através de estágios de filtração (EUROVENT, 2018).	66
Tabela 3.17: Fatores recomendados para cálculo da vazão de ar externo para estabelecimentos de ensino pela NBR 16.401-3 (ABNT, 2008).	68
Tabela 3.18: Fatores recomendados para cálculo da vazão de ar externo para estabelecimentos de ensino pela Norma ASHRAE 62.1 (adaptado de ASHRAE, 2003).	69
Tabela 3.19: Taxas típicas de ar externo para classes da EN 13779 (CEN, 2011) de ar interior (CEN, 2006).	70
Tabela 4.1: Características físicas da Sala A2.	73
Tabela 4.2: Dados técnicos dos condicionadores de ar da Sala A2 (CARRIER, 2022).	77
Tabela 4.3: Dados técnicos das caixas de renovação de ar da Sala A2 (MULTIVAC, 2017).	77
Tabela 4.4: Exemplo de planilha de coleta de dados utilizada durante os experimentos.	81
Tabela 4.5: Dados técnicos do soprador de folhas utilizado no experimento (STIHL, 2022).	86
Tabela 4.6: Dados técnicos dos ventiladores auxiliares (MULTIVAC, 2017).	92
Tabela 4.7: Dados técnicos do termo-higrômetro utilizado nos ensaios (HOMIS, 2022).	93
Tabela 4.8: Dados técnicos do medidor de CO ₂ utilizado nos ensaios (TESTO, 2022).	95
Tabela 4.9: Dados técnicos do contador de partículas utilizado nos experimentos (GRAYWOLF, 2018).	97
Tabela 4.10: Dados técnicos do multimedidor de parâmetros da QAI (GUILHOTTI, 2021).	102
Tabela 4.11: Dados de precisão de multimedidor de QAI para concentração de materiais particulados. (SENSIRION, 2022).	104
Tabela 4.12: Dados técnicos do medidor de vazão de ar utilizado nos ensaios (SHORTRIDGE, 1990).	105
Tabela 4.13: Dados técnicos do amostrador de bioaerossóis utilizado nos ensaios.	106
Tabela 4.14: Dados técnicos da estação meteorológica (ACURITE, 2022).	109
Tabela 4.15: Dados técnicos do medidor de distância utilizado no experimento.	110
Tabela 4.16: Resumo das incertezas calculadas para os parâmetros monitorados nos ensaios.	111
Tabela 4.17: Significado numérico do coeficiente de correlação linear de Pearson.	113
Tabela 4.18: Exemplo de formato de matriz de correlação para um sistema com multivariáveis.	114
Tabela 5.1: Matriz de correlação linear de Pearson entre os parâmetros psicrométricos.	138
Tabela 5.2: Matriz de correlação linear de Pearson entre os parâmetros de qualidade do ar.	138

Tabela 5.3: Matriz de correlação linear de Pearson entre os parâmetros de qualidade do ar.	138
Tabela 5.4: Condições médias de referência dos parâmetros termo-higrométricos e de concentração de CO ₂ e materiais particulados na sala.	141
Tabela 5.5: Condições médias de referência dos agentes microbiológicos na sala.	141
Tabela 5.6: Matriz de correlação linear de Pearson entre concentrações de particulados no ar externo.	149
Tabela 5.7: Matriz de correlação linear de Pearson entre concentrações de particulados e CO ₂ internos.	149
Tabela 5.8: Coeficientes de correlação linear de Pearson entre concentrações de fungos viáveis e de materiais particulados no ar externo.	150
Tabela 5.9: Coeficientes de correlação linear de Pearson entre concentrações de fungos viáveis, de materiais particulados e de CO ₂ no ar interior.	150
Tabela 5.10: Coeficientes de correlação linear de Pearson entre as concentrações de cada contaminantes nos ambientes interno e externo.	152
Tabela 5.11: Matriz de correlação linear de Pearson entre concentrações de particulados no ar externo.	162
Tabela 5.12: Matriz de correlação linear de Pearson entre concentrações de particulados e CO ₂ internos.	162
Tabela 5.13: Coeficientes de correlação linear de Pearson entre concentrações de fungos viáveis e de materiais particulados no ar externo.	163
Tabela 5.14: Coeficientes de correlação linear de Pearson entre concentrações de fungos viáveis, de materiais particulados e de CO ₂ no ar interior.	163
Tabela 5.15: Coeficientes de correlação linear de Pearson entre as concentrações de cada contaminantes nos ambientes interno e externo.	164
Tabela Ap.C.1: Valores de massa específica média dos particulados obtidos em estudos ao redor do mundo (ZHAO et al., 2017).	194
Tabela Ap.F.1: Características físicas das Salas MT-16 e MT-06 do LEQAI.	202
Tabela Ap.H.1: Estimativa de incertezas para o diâmetro dos materiais particulados.	215
Tabela Ap.H.2: Incertezas calculadas para as medições de materiais particulados.	215
Tabela Ap.H.3: Incertezas-padrão para parâmetros envolvidos no cálculo da vazão de ar.	217
Tabela Ap.H.4: Incertezas calculadas para vazão de ar em função das caixas em operação.	219
Tabela An.B.1: Critérios para episódios agudos de poluição do ar no Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2013).	225
Tabela An.B.2: Estrutura do Índice de Qualidade do Ar (CETESB, 2022).	225

Tabela An.C.1: Dados das medições Oficina de Carrinhos de Rolimã, edição de 2016, 1º Dia, 21/10/2016 (Fakhoury, 2017)	227
Tabela An.C.2: Dados das medições Oficina de Carrinhos de Rolimã, edição de 2016, 2º Dia, 22/10/2016 (Fakhoury, 2017)	228
Tabela An.C.3: Dados das medições Oficina de Carrinhos de Rolimã, edição de 2017, 1º Dia, 21/10/2017 (Dal Pogeto, 2018)	229
Tabela An.C.4: Dados das medições Oficina de Carrinhos de Rolimã, edição de 2017, 2º Dia, 22/10/2017 (Dal Pogeto, 2018)	230
Tabela An.C.5: Dados das medições Oficina de Carrinhos de Rolimã, edição de 2018, 1º Dia, 21/10/2018, Manhã.....	231
Tabela An.C.6: Dados das medições Oficina de Carrinhos de Rolimã, edição de 2018, 1º Dia, 21/10/2018, Tarde.....	232
Tabela An.C.7: Dados das medições Oficina de Carrinhos de Rolimã, edição de 2018, 2º Dia, 22/10/2018, Manhã.....	233
Tabela Na.C.8: Dados das medições Oficina de Carrinhos de Rolimã, edição de 2018, 2º Dia, 22/10/2018, Tarde.....	234
Tabela An.D.1: Dados das medições Oficina de Brinquedos, edição de 2016, 21/05/2016 (Fakhoury, 2017)	236
Tabela An.D.2: Dados das medições Oficina de Brinquedos, edição de 2017, 10/06/2017 (Dal Pogeto, 2018).....	237
Tabela An.D.3: Dados das medições Oficina de Brinquedos, edição de 2018, 09/10/2018, Manhã (Guilhotti, 2021)	238
Tabela An.D.4: Dados das medições Oficina de Brinquedos, edição de 2018, 09/10/2018, Tarde (Guilhotti, 2021)	239
Tabela An.D.5: Dados das medições Oficina de Brinquedos, edição de 2019, 01/06/2019, Manhã.	240
Tabela An.D.6: Dados das medições Oficina de Brinquedos, edição de 2019, 01/06/2019, Manhã/Tarde.....	241
Tabela An.D.7: Dados das medições Oficina de Brinquedos, edição de 2019, 01/06/2019, Tarde.....	242
Tabela An.E.1: Dados das medições de distância do operador, Experimento Varredor Pneumático, 17/10/2020.	244
Tabela An.E.2: Dados das medições das condições meteorológicas, Experimento Varredor Pneumático, 17/10/2020.	245

Tabela An.E.3: Dados das medições parâmetros, Experimento Varredor Pneumático, 17/10/2020, Ar Externo, Parte A.....	246
Tabela An.E.4: Dados das medições parâmetros, Experimento Varredor Pneumático, 17/10/2020, Ar Externo, Parte B.	247
Tabela An.E.5: Dados das medições parâmetros, Experimento Varredor Pneumático, 17/10/2020, Ar Interior, Parte A.....	248
Tabela An.E.6: Dados das medições parâmetros, Experimento Varredor Pneumático, 17/10/2020, Ar Interior, Parte B.....	249
Tabela An.E.7: Dados das medições fungos viáveis, Experimento Varredor Pneumático, 17/10/2020, Ar Externo, Parte A (apoio Conforlab).	250
Tabela An.E.8: Dados das medições fungos viáveis, Experimento Varredor Pneumático, 17/10/2020, Ar Externo, Parte B (apoio Conforlab).	251
Tabela An.E.9: Dados das medições fungos viáveis, Experimento Varredor Pneumático, 17/10/2020, Ar Interior, Parte A (apoio Conforlab).....	252
Tabela An.E.10: Dados das medições fungos viáveis, Experimento Varredor Pneumático, 17/10/2020, Ar Interior, Parte B (apoio Conforlab).	253
Tabela An.F.1: Dados das medições CO ₂ e parâmetros psicrométricos, Experimento Troca de Filtros, 20/11/2021, Ar Interior.	255
Tabela An.F.2: Dados das medições de vazão de ar, Experimento Troca de Filtros, 20/11/2021.	256
Tabela An.F.3: Dados das medições de particulados, Experimento Troca de Filtros, 20/11/2021, Ar Interior, Parte A.....	257
Tabela An.F.4: Dados das medições de particulados, Experimento Troca de Filtros, 20/11/2021, Ar Interior, Parte B.	258
Tabela An.F.5: Dados das medições de particulados, Experimento Troca de Filtros, 20/11/2021, Ar Externo.	259
Tabela An.F.6: Dados das medições fungos viáveis, Experimento Troca de Filtros, 20/11/2021, Ar Interior, Lado Esquerdo (apoio Conforlab).....	260
Tabela An.F.7: Dados das medições fungos viáveis, Experimento Troca de Filtros, 20/11/2021, Ar Interior, Lado Direito (apoio Conforlab).....	260
Tabela An.F.8: Dados das medições fungos viáveis, Experimento Troca de Filtros, 20/11/2021, Ar Externo (apoio Conforlab).	261

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACGIH	<i>American Conference of Governmental Industrial Hygienists</i>
ACS	<i>American Cancer Society</i>
AIHA	<i>American Industrial Hygiene Foundation</i>
AIVC	<i>Air Infiltration and Ventilation Centre</i>
ALA	<i>American Lung Association</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
AQG	<i>Air Quality Guideline</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
CAM	Centro Acadêmico da Engenharia Mecânica e Mecatrônica
CDC	<i>Centers for Disease Control and Prevention</i>
CE	Centro da Sala
CEN	Comitê Europeu de Normalização
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CFU	<i>Colony Forming Unit</i>
CLO	Unidade de medição da resistência térmica da vestimenta
CO	Monóxido de Carbono

CO ₂	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CONBRAVA	Congresso Brasileiro de Refrigeração, Ar-condicionado, Ventilação, Aquecimento e Tratamento de Ar
CONSEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
CP	Contador de Partículas
CoV	Coronavirus
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
COVID	<i>CoronaVirus Disease</i>
COV-S	Compostos Orgânicos Semi Voláteis
CX	Caixa de Ventilação
DAE	Difusor de Ar Externo
DC	<i>Damper</i> com aletas convergentes
DEPTO	Departamento
DHS	<i>Department of Health Services</i>
DM	<i>Damper</i> Motorizado
EHA	<i>Exhaust Air</i>
EM	Estação Meteorológica
EN	Norma Europeia
EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
ETA	<i>Extract Air</i>
EX	Exaustor

EXAT	Exatidão
FC	Condicionador de ar do tipo <i>Fan Coil</i>
FI	Filtro de Ar
FR	Caixa de Filtragem de Ar
FV	Fungos Viáveis
GF	<i>Gas Filter</i>
GAEF	<i>Gesellschaft für Aerosolforschung (Association for Aerosol Research)</i>
GUM	<i>Guide to Expression of Uncertainty in Measurement</i>
HC	Hidrocarbonetos
HPA	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i>
IAQ	<i>Indoor Air Quality</i>
IDA	<i>Indoor Air</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEQ	<i>Indoor Environmental Quality</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	International Organization for Standardization
IT	<i>Interim Target</i>
LD	Lado Direito da sala
LE	Lado Esquerdo da sala
LEQAI	Laboratório de Estudo da Qualidade do Ar de Interiores
LEO	Limite de Exposição Ocupacional

LIQ	Limite Inferior de Quantificação
MAX	Valor Máximo
MERCOFRIO	Congresso Internacional de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação
MERV	<i>Minimum Efficiency Reporting Value</i>
MET	Unidade de medição do nível de metabolismo
MI	Meta Intermediária
MIN	Valor Mínimo
MP	Material Particulado
MT06	Laboratório de Túneis de Vento
MT16	Laboratório de Instrumentação
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
MV	Medidor de Vazão
NBR	Norma Brasileira
NCCEH	<i>National Collaborating Centre for Environmental Health</i>
NDIR	<i>Non-Dispersive Infrared</i>
NO	Óxido de Nitrogênio
NO ₂	Dióxido de Nitrogênio
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
NR	Normas Regulamentadoras
O ₂	Oxigênio
ODA	<i>Outdoor Air</i>
OB	Oficina de Brinquedos

OCR	Oficina de Carrinhos de Rolimã
OMS	Organização Mundial da Saúde
OPS	<i>Optical Particle Sizer</i>
PDT	Transmissor de Pressão Diferencial (<i>Differential Pressure Transmitter</i>)
PF	Padrão de Qualidade do Ar Final
PI	Padrões de Qualidade do Ar Intermediários
PPD	Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas (<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i>)
PPM	Partes por Milhão
PM	Material Particulado (<i>Particulate Matter</i>)
PM ₁₀	Partículas Inaláveis
PM _{2,5}	Partículas Inaláveis Finas
PM ₁	Partículas Inaláveis Ultrafinas menores que 1,0 µm
PM _{0,5}	Partículas Inaláveis Ultrafinas menores que 0,5 µm
PM/	Ponto de Medição
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i>
PTS	Partículas Totais em Suspensão
PV	Pressão de Vapor
QAI	Qualidade do Ambiente Interior
QD	Quina Direita da sala
QE	Quina Esquerda da sala
QUALAR	Sistema de Informações de Qualidade do Ar
RA	Resistência de Aquecimento

RCA	<i>Recirculation air</i>
RDC	Resolução de Diretoria Colegiada
RE	Resolução
REHVA	<i>Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations</i>
RP	<i>Research Project</i>
SAGE	<i>Scientific Advisory Group for Emergencies</i>
SARS	Síndrome Respiratória Aguda Grave
SED	Síndrome dos Edifícios Doentes
SO ₂	Dióxido de Enxofre
SR	Serpentina
STEL	<i>Short Time Exposure Limit</i>
SUP	<i>Supply Air</i>
TBU	Temperatura de Bulbo Úmido
TBS	Temperatura de Bulbo Seco
TLV	<i>Threshold Limit Value</i>
TWA	<i>Time Weight Average</i>
UE	Unidade Evaporadora
UC	Unidade Condensadora
UFC	Unidades Formadoras de Colônias
UR	Umidade Relativa
URA	Unidade de Renovação de Ar
USP	Universidade de São Paulo

VAV	Volume de Ar Variável
VE	Ventilador
VF	Variador de Frequências
VME	Voto Médio Estimado
VMR	Valor Máximo Recomendável
VOC	<i>Volatile Organic Compounds</i>
VP	Varredor Pneumático
VSP	Veneziana de Sobre Pressão
VZ	Veneziana
WHO	<i>World Health Organization</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área do ambiente.....	[m ²]
A_z	Área útil ocupada.....	[m ²]
a	Meia largura da distribuição.....	[-]
a_+	Limite superior da distribuição.....	[-]
a_-	Limite inferior da distribuição.....	[-]
C	Concentração medida do gás.....	[ppm]
c_{ETA}	Concentração de materiais particulados no ar extraído da zona de ocupação (<i>Extract Air</i>)	[µg/m ³]
c_{FV}	Concentração de fungos viáveis.....	[UFC/m ³]
c_{IDA}	Concentração de materiais particulados no ar externo (<i>Indoor Air</i>)	[µg/m ³]
c_{PM}	Concentração de materiais particulados.....	[µg/m ³]
c_{ODA}	Concentração de materiais particulados no ar externo (<i>Outdoor Air</i>)	[µg/m ³]
c_{SUP}	Concentração de materiais particulados no ar insuflado (<i>Supply Air</i>)	[µg/m ³]
cov	Covariância entre duas variáveis.....	[-]
d_{part}	Diâmetro da partícula.....	[µm]
E_j	Eficiência de filtragem de um dado estágio	[%]
E_{RCA}	Eficiência de filtragem no equipamento de recirculação.....	[%]
E_t	Eficiência de filtragem total.....	[%]

F_A	Vazão de ar externo por área útil ocupada.....	[l/(s*m ²)]
F_P	Vazão de ar externo por ocupante.....	[l/(s*peessoa)]
I	Intensidade da radiação recebida pelo detector.....	[W/m ²]
I_0	Intensidade da radiação emitida pela fonte.....	[W/m ²]
l	Comprimento percorrido entre o emissor e o detector.....	[m]
k	Fator de abrangência.....	[-]
k_λ	Coefficiente de absorção do gás para um comprimento de onda...	[m ² /μg]
k_{pc}	Fator de correção da vazão pela perda de carga do instrumento...	[-]
\dot{m}	Vazão mássica.....	[kg/s]
\dot{m}_{AE}	Vazão mássica de ar externo.....	[kg/s]
\dot{m}_{GER}	Vazão mássica de materiais particulados gerada internamente.....	[kg/s]
\dot{m}_{RCA}	Vazão mássica de recirculação de ar.....	[kg/s]
\dot{m}_{RES}	Vazão mássica de materiais particulados ressuspendida.....	[kg/s]
\dot{m}_{SUP}	Vazão mássica de ar externo insuflado (<i>Supply Air</i>)	[kg/s]
n	Número de medições da amostra.....	[medições]
N_{cont}	Número de contagem de fungos viáveis.....	[UFC]
N_{CX}	Número de caixas de ventilação em operação.....	[caixas]
N_{ocup}	Número de ocupantes do ambiente.....	[pessoas]
N_{part}	Número total de partículas.....	[Part.]
n_{part}	Número de partículas por volume de ar.....	[Part./m ³]
P_z	Número máximo de pessoas na zona de ocupação.....	[pessoa]
P	Pressão barométrica.....	[kPa]

P_{ar}	Pressão do ar seco.....	[kPa]
P_{local}	Pressão barométrica local.....	[kPa]
P_{ref}	Pressão barométrica de referência.....	[kPa]
P_v	Pressão de vapor nas condições do ar local.....	[kPa]
$P_v(T)$	Pressão de vapor da mistura saturada na temperatura local.....	[kPa]
Q	Vazão volumétrica.....	[m ³ /h]
Q_b	Vazão volumétrica da bomba de vácuo.....	[m ³ /h]
Q_i	Vazão volumétrica medida na saída de cada difusor.....	[m ³ /h]
Q_{corr}	Vazão volumétrica corrigida.....	[m ³ /h]
Q_{lido}	Vazão volumétrica lida no instrumento de medição.....	[m ³ /h]
Q_{SUP}	Vazão volumétrica de ar externo insuflado (<i>Supply Air</i>)	[m ³ /h]
r	Coefficiente de correlação linear de Pearson.....	[-]
R_a	<i>Area Outdoor Air Rate</i>	[l/(s*m ²)]
R_{ar}	Constante dos gases ideais para o ar seco.....	[kJ/kg °C]
R_p	<i>People Outdoor Air Rate</i>	[l/(s*peessoa)]
S_x	Desvio padrão de uma amostra da variável x.....	[-]
S_y	Desvio padrão de uma amostra da variável y.....	[-]
S_{xy}	Covariância das amostras das variáveis x e y.....	[-]
T	Temperatura.....	[K]
t	Instante de tempo.....	[s]
t_0	Instante de tempo inicial.....	[s]
t_a	Tempo de coleta da amostra.....	[s]

T_{BS}	Temperatura de bulbo seco.....	[°C]
T_{local}	Temperatura de bulbo seco local.....	[K]
T_{ref}	Temperatura de bulbo seco de referência.....	[K]
U_B	Incerteza expandida do tipo B.....	[-]
U_{PM}	Incerteza expandida da concentração de particulados.....	[µg/m ³]
u_B	Incerteza padrão do tipo B.....	[-]
u_C	Incerteza padrão combinada.....	[-]
u_{Clab}	Incerteza padrão informada pelo laboratório.....	[UFC/m ³]
u_{CFV}	Incerteza padrão total da concentração de fungos viáveis.....	[UFC/m ³]
u_{CPM}	Incerteza padrão combinada da concentração de particulados.....	[µg/m ³]
u_d	Incerteza padrão do diâmetro das partículas.....	[µm]
$u_{k_{pc}}$	Incerteza padrão do fator de correção pela perda de carga.....	[-]
$u_{m_{AE}}$	Incerteza padrão da vazão mássica total de ar externo.....	[kg/s]
$u_{\dot{m}_i}$	Incerteza padrão da vazão mássica na saída de cada difusor.....	[kg/s]
u_N	Incerteza padrão do número total de partículas.....	[part.]
u_P	Incerteza padrão da pressão barométrica.....	[kPa]
u_{PV}	Incerteza padrão da pressão de vapor.....	[kPa]
u_ρ	Incerteza padrão da massa específica das partículas.....	[kg/m ³]
u_Q	Incerteza padrão da vazão volumétrica.....	[m ³ /h]
u_{TBS}	Incerteza padrão da temperatura de bulbo seco	[°C]
u_{UR}	Incerteza padrão da umidade relativa.....	[%]
$u(x_i)$	Incerteza padrão de uma dada variável da fórmula.....	[-]

UR	Umidade relativa.....	[%]
V	Volume de ar do ambiente.....	[m ³]
V_D	Velocidade de deposição de materiais particulados.....	[m/s]
V_{ef}	Vazão efetiva de ar exterior.....	[l/s]
V_z	Vazão de ar exterior na zona ocupada.....	[l/s]
\bar{x}	Média da amostra da variável x.....	[-]
x_i	Um dado valor da amostra da variável x.....	[-]
Y	Valor verdadeiro da grandeza.....	[-]
y	Valor experimental.....	[-]
\bar{y}	Média da amostra da variável y.....	[-]
y_i	Um dado valor da amostra da variável y.....	[-]
z	Coefficiente obtido pela transformação de Fisher.....	[-]

Símbolos Gregos

ε_V	Eficiência de ventilação.....	[-]
λ	Comprimento de onda.....	[μm]
η	Rendimento.....	[%]
ρ	Massa específica do ar interno.....	[kg/m ³]
ρ_{AE}	Massa específica do ar externo.....	[kg/m ³]
ρ_P	Massa específica dos materiais particulados.....	[kg/m ³]
$\sigma(z)$	Desvio padrão da distribuição z.....	[-]

Subscritos

<i>AE</i>	Ar externo
<i>ar</i>	Ar seco
<i>b</i>	Bomba de Vácuo
<i>Cont</i>	Contagem de fungos viáveis
<i>Ef</i>	Efetivo
<i>D</i>	Deposição
<i>ETA</i>	<i>Extract Air</i> (Ar extraído da zona de ocupação)
<i>GER</i>	Gerado no interior do ambiente
<i>IDA</i>	<i>Indoor Air</i> (Ar Interior)
<i>local</i>	Condições locais
<i>Part</i>	Partículas
<i>Ocup</i>	Ocupantes
<i>ODA</i>	<i>Outdoor Air</i> (Ar Externo)
<i>RCA</i>	<i>Recirculation air</i> (Ar de Recirculação)
<i>Ref</i>	Referência
<i>RES</i>	Ressuspendido
<i>SUP</i>	<i>Supply Air</i> (Ar de Insuflamento)
<i>V</i>	Ventilação
<i>v</i>	Vapor de água
<i>Z</i>	Zona de ocupação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	36
2. OBJETIVOS	40
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	42
3.1. Parâmetros da QAI.....	42
3.2. Temperatura e Umidade Relativa	43
3.3. Dióxido de Carbono (CO₂).....	44
3.3.1. Limites de concentração para QAI	45
3.3.2. CO ₂ como indicador da QAI	47
3.4. Materiais Particulados (PMs)	48
3.4.1. Limites de concentração	50
3.4.2. Requisitos de filtragem.....	54
3.5. Vazão de Ar Externo	67
3.5.1. Requisitos de vazão	67
4. METODOLOGIA E APARATO EXPERIMENTAL	71
4.1. Aprofundamento Teórico.....	71
4.2. Eventos Monitorados	72
4.3. Ambientes de Estudo	73
4.3.1. Sala de Aula A2.....	73
4.4. Procedimentos Experimentais	78
4.4.1. Medições nos eventos de oficinas	78
4.4.1.1. Medições de estratificação na sala	81
4.4.1.2. Medições de decaimento de contaminantes	82
4.4.2. Medições no evento com varredor pneumático.....	84
4.4.2.1. Análise biológica de fungos viáveis.....	86
4.4.3. Medições com troca de filtros de diferentes classes de filtragem	89

4.5. Instrumentação	93
4.5.1. Temperatura e umidade relativa	93
4.5.2. Dióxido de carbono (CO ₂).....	94
4.5.3. Materiais particulados (PMs).....	96
4.5.4. Medidor contínuo de parâmetros da QAI.....	101
4.5.5. Vazão de ar externo de renovação.....	104
4.5.6. Fungos viáveis	106
4.5.7. Velocidade e direção do vento.....	108
4.5.8. Distância	110
4.6. Análise de Incertezas	110
4.6.1. Resumo das incertezas.....	111
4.7. Análise de Correlações	112
4.7.1. Intervalos de confiança.....	114
5. RESULTADOS DOS ENSAIOS E ANÁLISES.....	116
5.1. Medições nos Eventos de Oficinas.....	116
5.1.1. Oficinas de Carinhos de Rolimã.....	116
5.1.1.1. Temperatura e umidade relativa.....	117
5.1.1.2. Vazão de ar externo de renovação.....	120
5.1.1.3. Concentração de CO ₂	123
5.1.1.4. Concentração de particulados (PMs).....	125
5.1.2. Oficinas de Brinquedos	130
5.1.2.1. Temperatura e umidade relativa.....	130
5.1.2.2. Vazão de ar externo de renovação.....	132
5.1.2.3. Concentração de CO ₂	133
5.1.2.4. Concentração de particulados (PMs).....	135
5.1.3. Estudo de correlações	137
5.2. Medições no Evento com Varredor Pneumático.....	140

5.2.1.	Condições de referência.....	140
5.2.2.	Posição do varredor pneumático.....	141
5.2.3.	Condições meteorológicas.....	142
5.2.4.	Temperatura e umidade relativa.....	142
5.2.5.	Concentração de CO ₂	143
5.2.6.	Concentração de particulados (PMs).....	144
5.2.7.	Concentração de fungos viáveis.....	146
5.2.8.	Estudo de correlações.....	148
5.3.	Medições com Troca de Filtros de Diferentes Classes de Filtragem.....	153
5.3.1.	Temperatura e umidade relativa.....	153
5.3.2.	Vazão de ar externo de renovação.....	155
5.3.3.	Concentração de CO ₂	156
5.3.4.	Concentração de particulados (PMs).....	157
5.3.5.	Concentração de fungos viáveis.....	159
5.3.6.	Estudo de correlações.....	161
6.	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	166
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	171
	APÊNDICE A – Parâmetros de Conforto para Velocidade do Ar.....	189
	APÊNDICE B – Principais Fontes de Emissão de CO₂.....	190
	APÊNDICE C – Distribuição de Tamanhos de Particulados Presentes no Ar Externo.....	192
	APÊNDICE D – Influência da QAI sobre o Desempenho dos Ocupantes.....	195
	APÊNDICE E – Modelagem de um Ambiente.....	199
	APÊNDICE F – Ambientes LEQAI – Salas MT-16 e MT-06.....	202
	APÊNDICE G – Correção de Medições de Vazão de Ar Externo.....	206
	APÊNDICE H – Detalhamento da Análise de Incertezas.....	209
	Ap.H.1. Incertezas nos Materiais Particulados (PMs).....	211
	Ap.H.2. Incertezas na Vazão de Ar Externo.....	216

Ap.H.3. Incertezas nos Fungos Viáveis.....	220
ANEXO A – Contaminantes em Ambientes Internos e Fontes	223
ANEXO B – Critérios para Episódios Agudos de Poluição do Ar	225
ANEXO C – Tabelas de Medições Oficinas de Carrinhos de Rolimã	226
An.C.1. Oficina de Carrinhos de Rolimã - Edição de 2016	227
An.C.2. Oficina de Carrinhos de Rolimã - Edição de 2017	229
An.C.3. Oficina de Carrinhos de Rolimã - Edição de 2018	231
ANEXO D – Tabelas de Medições Oficinas de Brinquedos	235
An.D.1. Oficina de Brinquedos - Edição de 2016.....	236
An.D.2. Oficina de Brinquedos - Edição de 2017	237
An.D.3. Oficina de Brinquedos - Edição de 2018.....	238
An.D.4. Oficina de Brinquedos - Edição de 2019.....	240
ANEXO E – Tabelas de Medições Experimento Varredor Pneumático	243
An.E.1. Posição do Soprador Pneumático	244
An.E.2. Condições Meteorológicas	245
An.E.3. Concentrações de Particulados, de CO ₂ e Parâmetros Psicrométricos.....	246
An.E.4. Concentrações de Fungos Viáveis.....	250
ANEXO F – Tabelas de Medições Experimento Troca de Filtros	254
An.F.1. Concentração de CO ₂ e Parâmetros Psicrométricos.....	255
An.F.2. Vazões de Ar nos Difusores	256
An.F.3. Concentrações de Particulados	257
An.F.4. Concentrações de Fungos Viáveis.....	260

1. INTRODUÇÃO

A qualidade do ar de ambientes interiores vem sendo assunto de crescente debate na sociedade e nos meios especializados. Tal interesse é justificado uma vez que, de acordo com estudo realizado por Jenklins et al. (1992), um habitante típico de áreas urbanas passa em média cerca de 87% do tempo em ambientes interiores, sendo o restante expendido em ambiente exteriores e na transição entre esses dois tipos de ambientes, como por exemplo nos deslocamentos urbanos.

Com a chegada da pandemia do coronavírus (COVID-19), causada pelo vírus SARS-CoV-2, que vem acometendo o mundo desde o final de 2019, a questão da qualidade do ar que se respira nos ambientes fechados ganhou ainda mais relevância. A grande transmissibilidade do vírus requer a adoção de diversas restrições ao uso de ambientes coletivos, como restrições de capacidade, utilização de máscaras de proteção e até mesmo a proibição de operação para muitas categorias de estabelecimentos de uso coletivo durante períodos de pico de contágios.

Instituições internacionais de reconhecidas contribuições técnicas, como ASHRAE (2021), AIHA (2021), REHVA (2020) e GAEF (2020) apresentam informações baseadas em estudos científicos que confirmam a possibilidade de transmissão de microrganismos pelo ar, com contágio por meio das vias aéreas. O risco de transmissão pode ser intensificado em ambientes fechados com ventilação deficiente, exigindo uma análise criteriosa das condições de qualidade do ar interno para a retomada segura das atividades.

De forma geral, as características do ar no interior dos edifícios são afetadas tanto pela qualidade local do ar externo quanto pela produção de contaminantes e particulados no interior do ambiente (ANVISA, 2013). Em relação ao primeiro item, o desenvolvimento de novos materiais, novas substâncias e processos cada vez mais sofisticados tem culminado com a ampliação da diversidade de poluentes na atmosfera, com presença de particulados mais finos, que devem ser contemplados e analisados na definição dos requisitos de filtragem de ar dos sistemas de renovação.

Essas partículas de menor tamanho, compostas por elementos de diâmetros inferiores a 2,5 μm , são provenientes essencialmente das atividades humanas, produtos de combustão, emissões de veículos e outros processos (GUSTAVSSON et al., 2011). Elas representam maiores riscos à

saúde devido à capacidade de atingirem áreas mais internas do sistema respiratório humano. Diversos estudos, em diferentes locais do mundo, como por exemplo em Pope et al. (2002), relacionam a exposição prolongada a particulados finos ao aumento da mortalidade por doenças cardiorrespiratórias e câncer de pulmão, principalmente em grupos de risco, como crianças e idosos.

A geração interna de contaminantes em ambientes é devida a duas principais fontes, sendo a primeira delas referente aos ocupantes e atividades relacionadas a eles e a segunda relativa aos materiais construtivos e interfaces com o ambiente (WHEELER, 1999). Seguindo este preceito, as vazões de renovação de ar são definidas por normas vigentes, como a NBR 16401 (ABNT, 2008), que utilizam para o cálculo da vazão de renovação de ar parcelas proporcionais ao número de ocupantes e à área do ambiente.

Em instituições acadêmicas, além dos aspectos relacionados à saúde e ao bem-estar dos ocupantes, aplicáveis a ambientes internos em geral, uma série de estudos, conforme detalhado no Apêndice D, apontam que a qualidade do ar interior e as condições de conforto térmico nas salas de aula promovem impacto direto na capacidade de aprendizado e desempenho acadêmico dos estudantes. Esse efeito é potencializado pela alta densidade ocupacional das salas de aula em relação a outros tipos de ocupações e pela maior vulnerabilidade das crianças e adolescentes em relação aos efeitos danosos dos contaminantes, por estarem com seus organismos em desenvolvimento.

O acréscimo no valor da taxa de renovação de ar projetada para um ambiente climatizado, em contrapartida, implica constantemente em uma elevação da carga térmica a ser removida pelo sistema AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado, similar a HVAC em inglês), para manter as condições internas do ambiente dentro das faixas requeridas para o conforto térmico. Conforme estudos apresentados em Olesen (2015), as condições de conforto térmico também influenciam o desempenho dos ocupantes.

Em sistemas de climatização que empregam o ciclo de refrigeração por compressão de vapor, este aumento de carga térmica e das vazões de ar envolvidas implica em um maior consumo de energia elétrica nos motores dos ventiladores de renovação de ar e nos compressores de fluido refrigerante dos condicionadores, apresentando assim uma grande influência sobre os custos operacionais e sobre a eficiência energética global da instalação, dois fatores adicionais de extrema relevância no dimensionamento e projeto de um sistema de AVAC.

No momento atual, devido ao impacto da pandemia do coronavírus (SARS-CoV-2, COVID-19), verifica-se uma forte tendência em se ampliar as vazões de renovação de ar de ambientes, visando à uma maior diluição dos contaminantes em seu interior. Esse acréscimo de vazão, contudo, deve ser avaliado criteriosamente. Devem ser consideradas as condições de projeto do sistema de climatização instalado no empreendimento, a qualidade do ar externo local, as classes dos filtros utilizados e as perdas de carga nas linhas, aspectos que, caso não avaliados corretamente, podem provocar um efeito contrário ao objetivado, provocando uma redução da qualidade do ar no interior do ambiente condicionado.

Desde o início da pandemia, renomadas instituições técnicas nacionais e internacionais, como ABRVA (2020), ASHRAE (2020) e REHVA (2020), emitiram guias de recomendação para utilização dos sistemas de condicionamento de ar durante a situação pandêmica, de grande importância para a orientação de usuários e operadores dos edifícios. As primeiras emissões destes guias visavam principalmente ações de caráter emergencial a serem realizadas para o enfrentamento da pandemia. Revisões recentes, como em ASHRAE (2021) e REHVA (2021), focam em como realizar a reabertura e o uso de forma segura e sustentável dos sistemas de condicionamento de ar dos edifícios durante a fase de reocupação pelos usuários.

Verifica-se, portanto, na presente situação, a importância do desenvolvimento de estudos detalhados que visem a estabelecer com maior exatidão a relação entre os parâmetros de qualidade do ar e as variáveis de projeto de um sistema AVAC, de forma a se determinar os elementos de maior criticidade para a obtenção de uma adequada qualidade do ar no interior do ambiente condicionado, aliado à maximização da eficiência energética e à redução do custo operacional do sistema, através da otimização da vazão de ar de renovação e do estudo de soluções alternativas que contribuam para reduzir o consumo de energia da instalação.

O presente projeto teve início em 2014, com a elaboração do Trabalho de Conclusão de Curso para graduação em Engenharia Mecânica na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, disponível em Rollo (2014), no qual foram realizados pelo autor os cálculos de carga térmica, o dimensionamento das redes de dutos e um esboço básico da configuração do sistema de condicionamento de ar projetado para atender a duas salas do prédio da Engenharia Mecânica da EPUSP, a Sala MT-16 - Laboratório de Instrumentação e a Sala MT-06 - Laboratório de Túneis de Vento.

Nos últimos anos, o projeto básico de climatização das salas e o objetivo do sistema foi sendo detalhado e aprimorado através da contribuição de alunos de mestrado e graduação da Escola

Politécnica, os quais, através de seus trabalhos, disponíveis por exemplo em Fakhoury (2016) e Guilhotti (2021), realizaram o detalhamento do projeto executivo de hidráulica e das redes de dutos das salas, a seleção dos equipamentos de ar condicionado e de ventilação e a definição dos parâmetros de qualidade do ar a serem monitorados na futura instalação, que recebeu o nome de LEQAI (Laboratório de Estudo da Qualidade do Ar de Interiores).

Ao longo deste período de desenvolvimento do projeto, foram elaboradas medições em campo, como parte do presente trabalho e de trabalhos anteriores da equipe do LEQAI, dos parâmetros de qualidade do ar interno e externo em eventos organizados pelo Programa Poli Cidadã e pelo Centro Acadêmico da Engenharia Mecânica e Mecatrônica (CAM), como as Oficinas de Brinquedos (OB) e as Oficinas de Carrinhos de Rolimã (OCR), nas quais são realizadas atividades educativas junto a alunos de escolas públicas da região. Foram ainda realizados experimentos específicos desenvolvidos para a avaliação de parâmetros da qualidade do ar.

Dos dados coletados nestas medições e das análises dos resultados obtidos, foram realizadas apresentações e publicações de trabalhos em congressos especializados do setor, como por exemplo em diferentes edições do CONBRAVA (Congresso Brasileiro de Refrigeração, Ar condicionado, Ventilação, Aquecimento e Tratamento de Ar) e MERCOFRIO (Congresso Internacional de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação), disponíveis em Rollo e Mariani (2015), Rollo et al. (2019), Rollo et al. (2021) e Rollo et al. (2022).

Como uma forma de incrementar a eficiência energética do sistema, o projeto elaborado para o Laboratório de Túneis de Vento (MT-06) contempla a instalação de um sistema do tipo ciclo-economizador, que viabiliza aumentar a vazão de ar externo para a área nos momentos em que as condições psicrométricas do ar externo local permitam, reduzindo o consumo de energia elétrica no circuito de refrigeração dos equipamentos de ar condicionado e incrementando a taxa de renovação de ar da sala.

Um estudo teórico das condições psicrométricas do ar externo na cidade de São Paulo foi realizado em Rollo (2014), conforme dados climáticos obtidos de ABNT (2008), tendo sido efetuada uma previsão dos momentos em que o sistema ciclo-economizador estaria apto para operação ao longo de um ano típico. Com a implantação do LEQAI, será possível realizar o monitoramento da instalação e a medição em campo da redução do consumo energético global do sistema devido ao emprego do sistema ciclo-economizador projetado, podendo esses dados energéticos serem integrados com as análises obtidas no presente trabalho acerca do comportamento dos parâmetros da qualidade do ar no interior no ambiente.

2. OBJETIVOS

O estudo proposto tem por objetivo central avaliar a Qualidade do Ar Interior (QAI) em um ambiente climatizado. Para atingir o objetivo são realizados ensaios experimentais com as medições de valores dos principais parâmetros relacionados à QAI. São também calculados coeficientes de correlação para estes parâmetros. Destaca-se que estes parâmetros são utilizados em projetos de sistemas de climatização de ambientes, valorizando os resultados do presente estudo, que pode colaborar em análises que possibilitam ampliar o conhecimento sobre fenômenos que ocorrem com o ar de ambiente interiores, como também colaborar no aperfeiçoamento de normas técnicas destinadas a sistemas AVAC.

O estudo tem como foco a avaliação de ambientes em instituições de ensino. É utilizado como base o ambiente da Sala A2 do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, detalhado no Item 4.3.1. Em paralelo, este estudo apresenta subsídios para os projetos que estão sendo desenvolvidos para as instalações, equipamentos e recursos de medição do Laboratório de Estudos da Qualidade do Ar Interior (LEQAI). Os equipamentos serão implantados nas salas MT-16 - Laboratório de Instrumentação e MT-06- Laboratório de Túneis de Vento do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP.

Os dados experimentais para atender aos objetivos do presente trabalho foram obtidos durante ensaios realizados em eventos do Programa Poli Cidadã e em experimentos sem ocupantes, devido às restrições impostas pela pandemia do Coronavírus, planejados para a avaliação de aspectos do comportamento de parâmetros da qualidade do ar interior sob condições específicas.

Os ensaios realizados para alcançar as metas deste projeto têm como definições as seguintes premissas:

- Os filtros utilizados nas unidades evaporadoras onde ocorre o tratamento do ar de recirculação são fixos e definidos pelos fabricantes;
- Os filtros das unidades de renovação de ar que insuflam ar externo são variados entre as duas tipologias usuais para ar condicionado em ambientes de salas de aula e de laboratórios acadêmicos.

- A variação da vazão de ar externo é realizada em intervalos definidos neste estudo, a partir de referências normativas e bibliográficas;
- Nestes ensaios são monitorados: temperatura de bulbo seco, umidade relativa e concentração de poluentes selecionados: CO₂, materiais particulados e fungos viáveis.

Completando as metas do presente trabalho são analisados os resultados obtidos, determinadas correlações entre valores de concentração de poluentes e seu comportamento quando alterados os dois principais fatores do processo de tratamento de ar investigados: vazão de ar externo e filtragem deste ar. Os resultados também são considerados comparativamente a estudos anteriores, como por exemplo Fakhoury (2016) e Guilhotti (2021).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na presente seção é realizada uma revisão bibliográfica acerca dos principais parâmetros para definição da qualidade do ar interior e das variáveis que exercem influência sobre as condições do ar nos ambientes condicionados, tais como os níveis de poluentes presentes no ar externo, as fontes de contaminantes internas do ambiente e as características do sistema de climatização e filtragem instalado. Para tal, serão apresentadas algumas das principais normas e recomendações técnicas que versam sobre este assunto e definem, por exemplo, limites de concentração aceitáveis para um dado poluente.

Estudos técnicos encontrados na literatura especializada são apresentados na presente seção, abordando os efeitos da qualidade do ar sobre o desempenho e o bem-estar dos ocupantes. O foco principal é dado para ambientes de ensino. As principais metodologias empregadas e os resultados obtidos por estes estudos são elencados no intuito de se mensurar o impacto da QAI sobre as atividades realizadas no interior do ambiente.

3.1. Parâmetros da QAI

De acordo com a definição apresentada em ASHRAE (2013), uma Qualidade do Ar Interior (QAI) aceitável é caracterizada por um ar em que não haja contaminantes conhecidos em concentrações prejudiciais, conforme determinado pelas autoridades responsáveis, e no qual uma maioria substancial (80% ou mais) das pessoas expostas não expresse insatisfação. Dessa forma, o conceito de qualidade do ar interior está relacionado com o conforto dos ocupantes de um ambiente e com o nível de contaminantes a que estes estão expostos.

O conforto ambiental geral de um ocupante no interior de um ambiente está relacionado com diversos fatores, conforme listados por Tribess (2012):

- Conforto térmico
- Conforto lumínico
- Conforto acústico
- Qualidade do ar interior
- Ergonomia

No presente trabalho são focados os aspectos relacionados ao conforto térmico e à qualidade do ar interior, conceitos interrelacionados. Conforme apresentado em ASHRAE (2010), o conceito de conforto térmico está relacionado a fatores ambientais e a aspectos referentes aos ocupantes, com os principais fatores que o influenciam sendo listados a seguir:

- Taxa metabólica
- Isolamento provido pelas vestimentas
- Temperatura do ar
- Temperatura radiante média
- Velocidade do ar
- Umidade do ar

Além destes fatores principais, existem diversos fatores secundários que podem influenciar o conforto térmico em determinadas circunstâncias, que podem ser verificados em ASHRAE (2010). Dos fatores elencados acima, o presente trabalho tem como foco o monitoramento dos parâmetros psicrométricos, referentes às condições de temperatura e umidade no ar interior.

Quanto aos possíveis contaminantes, EPA (2022) detalha elementos poluentes que podem ser encontrados em ambientes internos e suas principais fontes, conforme presente no Anexo A. Dentre os diversos contaminantes listados, o foco das avaliações realizadas no presente trabalho está no estudo do comportamento da concentração de materiais particulados e de agentes biológicos, representados pelos fungos viáveis, no interior do ambiente condicionado e na área externa. Serão também monitorados nos ensaios experimentais os parâmetros psicrométricos, relativos ao conforto térmico dos ocupantes, e a concentração de dióxido de carbono (CO₂). Um detalhamento das informações acerca de cada parâmetro estudado é apresentado a seguir.

3.2. Temperatura e Umidade Relativa

Os parâmetros psicrométricos de temperatura e umidade relativa no interior do ambiente serão monitorados ao longo dos experimentos para avaliar se os valores obtidos nas medições se encontram dentro dos intervalos recomendados pelas normas para conforto térmico. Assim, será possível verificar se o sistema de climatização projetado para o ambiente estudado atende às demandas de carga térmica dos eventos e, caso necessário, sugerir eventuais adequações a serem realizada no sistema.

De acordo com a Resolução RE- 09, presente em ANVISA (2003), a faixa recomendável de operação da Temperatura de Bulbo Seco (TBS) para ambientes em geral deverá variar de 23°C a 26°C para condições internas para verão e de 20°C a 22°C para condições internas de inverno, sendo que a seleção do valor utilizado depende da finalidade e do local da instalação.

Já em relação à umidade relativa, a mesma Resolução RE-09 (ANVISA, 2003) estabelece que para ambientes em geral, para condições de verão, a umidade relativa deverá variar de 40 a 65%, enquanto em condições de inverno a variação admissível será entre 35 e 65%. O valor máximo recomendado, portanto, ao longo do ano é de 65% de umidade relativa, com exceção de áreas de acesso, onde são admissíveis valores de até 70%.

A Norma NBR 16401-2 (ABNT, 2008), por sua vez, estabelece para as condições termo higrométricas no verão a faixa delimitada entre a UR máxima de 65% (com TBS entre 22,5°C e 25°C) e a UR mínima de 35% (com TBS entre 23°C e 26°C). Já para condições de inverno a variação recomendada é entre UR máxima de 60% (com TBS entre 21°C e 23,5°C) e UR mínima de 30% (com TBS entre 21,5°C e 24°C). Essas faixas são adotadas considerando-se uma roupa típica de 0,5 clo no verão e de 0,9 clo no inverno.

Em relação à velocidade do ar, os parâmetros de conforto recomendados pelas principais normas encontram-se detalhados no Apêndice A. Uma discussão acerca dos efeitos da umidade relativa sobre a saúde humana e da importância do seu controle no interior dos ambientes condicionados pode ser verificada em Mariani (2019), ressaltando-se os cuidados requeridos com a baixa umidade.

3.3. Dióxido de Carbono (CO₂)

O dióxido de carbono (CO₂) é um gás que naturalmente está presente na atmosfera terrestre e faz parte do ciclo de carbono. Este ciclo, porém, está sendo alterado pelas emissões referentes às atividades humanas, que vêm adicionando CO₂ a um nível em que os meios naturais, como florestas e solos, não possuem capacidade de remover e armazenar. Um resumo acerca das principais atividades emissoras de CO₂ e sua evolução ao longo dos últimos anos pode ser visualizado no Apêndice B.

Em relação aos ambientes internos, a emissão de CO₂ é devida principalmente aos ocupantes, podendo a sua taxa de produção variar também de acordo com a atividade realizada, em função da alteração do metabolismo. Os níveis de concentração de CO₂ verificados em ambientes

internos não costumam ser prejudiciais à saúde humana, apesar de poderem prejudicar as funções cognitivas, conforme apontado por Cozak e Aikawa (2022).

Uma relação de possíveis efeitos sobre o organismo humano em função da concentração de CO₂ é apresentada a seguir, adaptada de DHS (2022). Como referência, o limite de exposição recomendado pela Norma NBR 16401-3 (ABNT, 2008) é de 3.500 ppm, baseado em Health Canada (1995).

- 400 ppm: nível médio no ar externo;
- 400 a 1.000 ppm: nível típico obtido em ambientes ocupados com boa troca de ar;
- 1,000 a 2.000 ppm: nível associado à má qualidade do ar e sinais de sonolência;
- 2,000 a 5,000 ppm: nível associado a um ar estagnado e ambiente abafado, com sinais de dor de cabeça, sonolência, dificuldade de concentração, perda de atenção, aumento da frequência cardíaca e náusea leve;
- 5,000 ppm: indica condições atípicas do ar, onde altos níveis de outros gases também podem estar presentes. Intoxicação ou privação de oxigênio podem ocorrer;
- 40.000 ppm: nível é imediatamente prejudicial, devido à privação de oxigênio.

Em relação aos limites de insalubridade no Brasil, o Anexo N°11 da NR-15 (BRASIL, 1978), estabelece o limite de tolerância de 3.900 ppm de CO₂ para regime de trabalho de até 48 horas semanais. Este valor foi baseado em ACGIH (1977), que estabelece os valores médios para o LEO (Limite de Exposição Ocupacional), ou em inglês TLV (“*Threshold Limit Value*”), de 5.000 ppm TWA (“*Time Weight Average*”) para uma jornada de 40 horas semanais e de 30.000 ppm STEL (“*Short Time Exposure Limit*”) para uma exposição de curta duração, de até 15 minutos, podendo ocorrer até 4 vezes por dia, com intervalo de ao menos 60 minutos entre as exposições sucessivas.

3.3.1. Limites de concentração para QAI

Quanto ao nível máximo de concentração de CO₂ nos ambientes internos, a Resolução RE-09 (ANVISA, 2003) requer um limite admissível de 1.000 ppm, utilizado como indicador de renovação de ar externo, recomendado para o conforto e bem-estar dos ocupantes.

A Norma NBR 16.401-3 (ABNT, 2008), em seu Anexo C, explica que, na definição desse valor máximo de 1.000 ppm realizada por ANVISA (2003), é assumida arbitrariamente uma concentração de CO₂ no ar exterior de 300 ppm, quando na realidade este valor oscila entre 400

e 600 ppm). Desta forma, ao invés da determinação de um valor fixo limite de 1.000 ppm, a NBR 16.401-3 (ABNT, 2008) recomenda um limite de 700 ppm acima da concentração no ar exterior, conforme a Equação (3.1).

De fato, Cozac e Aikawa (2022) apontam valores típicos obtidos na área externa entre 400 e 500 ppm, o que representaria limites de concentração recomendados no interior do ambiente entre 1.100 e 1.200 ppm.

$$C_{CO_2 \text{ Limite Interno}} = C_{CO_2 AE} + 700 \quad (3.1)$$

A Norma ANSI/ASHRAE 62.1 (ASHRAE, 2013) também recomenda limite de concentração de CO₂ em regime permanente de 700 ppm acima da concentração externa, conforme dado pela Equação (3.1), apontando, com base nos dados detalhados na Norma ASTM D-6245 (ASTM, 2018), que manter o CO₂ dentro desta faixa indica que uma substancial maioria dos visitantes que entram no espaço estarão satisfeitos em relação à percepção dos bioefluentes (odores) humanos.

Já a Norma europeia EN16798-1 (CEN 2019) utiliza também como critério o diferencial de concentração ΔCO_2 entre os ambientes interno e externo. Ela aponta, porém, os diferenciais recomendados para quatro níveis de qualidade do ar objetivados no ambiente, em função do PPD (Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas- "*Predicted Percentage of Dissatisfied*" em inglês), com níveis I-15%, II-20%, III-30% e IV-40%.

Para o cálculo da ventilação e concentrações de CO₂, são apresentados diferentes métodos, cujas instruções de uso são detalhadas pela EN 16798-2 (CEN, 2019). Olesen et al. (2020) apresentam uma análise de resultados obtidos pelos diferentes métodos, conforme exemplo apresentado na Tabela 3.1, apontando que pode haver divergências em função do método empregado. Os valores em parênteses para nível IV foram obtidos com a vazão mínima recomendada por CEN (2019) de 4 l/(s*peessoa).

Tabela 3.1: ΔCO_2 para pessoas não adaptadas em função do tipo de espaço (OLESEN et al., 2020).

Space type	Occupancy [pers/m ²]	Category	Criteria in method 2 q_p	Derived from q_{tot} , Method 1	
				Very low-polluting building	Low-polluting building
				ΔCO_2 [ppm]	
Single office	0.1	I	550	370	278
		II	800	529	397
		III	1350	926	694
		IV	1350	1389 (1010)	1010 (794)
Landscape office	0.07	I	550	317	222
		II	800	454	317
		III	1350	794	556
		IV	1350	1170 (889)	794 (654)
Auditorium	1.33	I	550	535	517
		II	800	765	738
		III	1350	1339	1292
		IV	1350	2127 (1351)	2039 (1315)
Classroom	0.5	I	550	505	463
		II	800	722	661
		III	1350	1263	1157
		IV	1350	1984 (1292)	1792 (1208)

3.3.2. CO_2 como indicador da QAI

Em relação à utilização da concentração de CO_2 como indicador da qualidade do ar interno e do nível de renovação de ar de um dado ambiente, Prill (2020) afirma que o monitoramento dos níveis de CO_2 é uma ferramenta importante para auxiliar na obtenção de uma adequada ventilação de ar externo e de economia de energia, evitando-se uma ventilação excessiva em ambientes pouco ocupados. Para isso, pode-se empregar sistemas de controle de demanda com monitoramento contínuo dos níveis de CO_2 no ambiente, que utilizam sensores de custo acessível e suficiente grau de exatidão. Ele ressalta, porém, alguns erros e situações em que o CO_2 pode não ser um bom indicador da qualidade do ar:

- Avaliações significativas sobre a taxa de ventilação de ar externo com base em valores de CO_2 exigem que o ambiente seja ocupado por tempo suficiente para permitir que sejam atingidas condições de equilíbrio, de regime permanente, para a concentração de CO_2 em seu interior, em função da taxa de renovação de ar. Isso, em muitos casos, em ambientes pouco ventilados ou com fluxo variável de ocupantes, como em uma sala de aula, pode não acontecer ao longo do dia, com a concentração se mantendo em estados transitórios, que podem propiciar uma avaliação incorreta da taxa de ventilação.
- Muitos contaminantes presentes no ar interno podem ser gerados independentemente do número de ocupantes, por exemplo através de materiais construtivos ou fontes internas de geração. Por este motivo, em ambientes em que as fontes poluidoras são independentes da ocupação, o CO_2 pode não ser um bom critério para a avaliação da qualidade do ar interior.

De Gids e Woulters (2010) também ressalta que o emprego do CO₂ como indicador para a ventilação de ar, apesar de ser constantemente utilizado como um marcador dos bioefluentes produzidos pelos ocupantes, somente é apropriado para o caso em que não haja outro poluente que seja mais dominante no ambiente, em função das fontes de contaminantes internas presentes.

Com o advento da pandemia do coronavírus (COVID-19), Eykelbosh (2020), com base em estudos recentes realizados sobre a transmissão do vírus em ambientes internos, aponta que a correlação verificada entre os níveis de CO₂ monitorados em um espaço ocupado e o risco de transmissão da COVID-19 é fraca, em função dos diversos fatores que podem influenciá-los de forma independente. Apesar disso, afirma que o baixo custo de implementação do sistema de monitoramento de CO₂ e o seu uso em estratégias para acionamento da ventilação podem ajudar a melhorar a qualidade geral do ar interno, além de poder contribuir na educação dos ocupantes sobre como gerenciar ativamente a QAI.

Em relação a este assunto, SAGE (2021) também indica que o monitoramento contínuo de CO₂ não é um indicador confiável para avaliação do risco de transmissão por COVID-19 na maioria dos ambientes. Ressaltando que, principalmente em espaços de baixa ocupação ou grande volume, há uma incerteza muito maior nas medições de concentração CO₂, de forma que um baixo nível obtido de CO₂ não pode necessariamente ser usado como indicador de que a ventilação seja suficiente para mitigar eventuais riscos de transmissão.

3.4. Materiais Particulados (PMs)

A denominação de materiais particulados abrange um conjunto de poluentes constituídos de poeiras, fumaças e todo tipo de material sólido e líquido que se mantém suspenso na atmosfera por causa de seu pequeno tamanho (CETESB, 2022). Suas características físicas e químicas podem variar conforme a localidade. Dentre seus constituintes podem estar sulfatos, nitratos, amônio, íons orgânicos e inorgânicos, carbono elementar, água ligada a partículas, metais, HPAs (Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos), além de componentes biológicos como alérgenos e compostos microbianos (WHO, 2013).

As partículas poluentes podem ser originadas de dois diferentes tipos de fontes: primárias e secundárias. As fontes primárias são aquelas que emitem partículas diretamente, por exemplo fogões a lenha e incêndios florestais, enquanto as fontes secundárias emitem gases que podem formar partículas, como plantas de geração de energia. Algumas fontes ainda, como veículos,

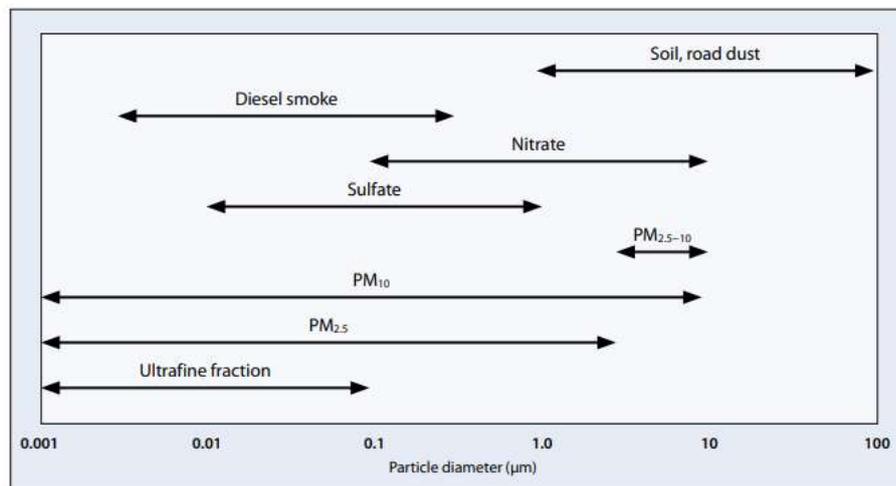
indústrias e construções, podem ser classificadas tanto como primárias ou como secundárias (CDC, 2022).

Os materiais particulados podem ser classificados da seguinte forma (EPA, 2022):

- PM₁₀ - Partículas inaláveis: com diâmetros de 10 µm e menores;
- PM_{2,5} - Partículas inaláveis finas: com diâmetros de 2,5 µm e menores.

Na Figura 3.1, pode-se visualizar um esquema da classificação dos materiais particulados, em função do tamanho das partículas, e as faixas em que tipicamente se encaixam os poluentes emitidos por algumas fontes poluidoras.

Figura 3.1: Esquema da classificação dos materiais particulados e algumas de suas fontes (WHO, 2005).



Dentre os efeitos prejudiciais à saúde verificados em função dos materiais particulados estão irritações nos olhos, garganta e pulmões, dificuldade de respiração e, em longo prazo, doenças cardiovasculares e câncer de pulmão, sendo os sintomas agravados em idosos, crianças e pessoas com doenças pré-existent de coração e de pulmão, como a asma (CDC, 2019).

O tamanho das partículas está diretamente associado ao seu potencial para causar problemas à saúde, sendo que, quanto menores as partículas, maiores os efeitos provocados (CETESB, 2022). Conforme apontado por WHO (2013), há boas evidências dos efeitos provocados pela exposição de curto prazo ao PM₁₀ na saúde respiratória. Em relação à mortalidade, porém, especialmente como consequência da exposição a longo prazo, o PM_{2,5} é um fator de risco maior do que a parte grossa do PM₁₀ (partículas na faixa entre 2,5 e 10 µm), em função de atingir áreas mais internas do sistema respiratório.

Analitis et al. (2016) estimaram os efeitos das partículas PM_{10} sobre dados de mortalidade cardiovascular e respiratórias em 29 cidades da Europa, obtendo valores para o aumento no número de mortes diárias para cada acréscimo de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} de 0,76% para doenças cardiovasculares e de 0,58% para doenças respiratórias. Em investigação similar realizada na Europa e na América do Norte, Samoli et al. (2008) estimaram um aumento na mortalidade geral, para cada acréscimo de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} , da ordem de 0,84%, 0,33% e 0,29% para cidades canadenses, europeias e americanas respectivamente.

Pope et al. (2002), por sua vez, realizaram uma investigação com dados obtidos junto à ACS (“*American Cancer Society*”) de mais de 1,2 milhões de indivíduos em áreas metropolitanas nos Estados Unidos, obtendo uma estimativa do aumento da mortalidade em função de uma elevação de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na concentração de partículas finas ($PM_{2,5}$) de 4%, 6% e 8%, referentes a todas as causas, câncer de pulmão e doenças cardiorrespiratórias, respectivamente. Neste estudo não foram verificadas associações consistentes com a mortalidade para as partículas grossas (PM_{10}) e partículas totais em suspensão (PTS).

As partículas finas, em função de seu peso, podem manter-se suspensas por um longo período. Partículas entre $0,1 \mu\text{m}$ e $1 \mu\text{m}$ de diâmetro, por exemplo, podem permanecer na atmosfera por dias ou semanas e, desta forma, estarem sujeitas a serem transportadas por um longo alcance, atingindo áreas distantes da fonte poluidora (WHO, 2013).

No capítulo 5 são apresentados valores dos particulados finos PM_1 e $PM_{0,5}$ monitorados durante os ensaios experimentais realizados. Conforme ressaltado por Tronville et al. (2023), apesar da crescente preocupação com os efeitos sobre a saúde da exposição a partículas transportadas pelo ar menores que $1 \mu\text{m}$, especialmente aquelas abaixo $0,1 \mu\text{m}$, não existem padrões de qualidade do ar amplamente reconhecidos ou estabelecidos para PM_1 e $PM_{0,1}$. Já para PM_{10} e $PM_{2,5}$ existem definições rigorosas para os padrões limites de qualidade do ar, para o seu monitoramento e análise, dadas por exemplo na Norma Europeia EN 12341 (CEN, 2014).

3.4.1. Limites de concentração

No presente item serão apresentados os limites máximos de concentração para os diferentes tamanhos de materiais particulados recomendados pelas principais normas e regulamentações brasileiras e internacionais.

A Organização Mundial da Saúde (OMS), apresenta em WHO (2021) níveis recomendados de concentração de particulados AQG (do inglês “*Air Quality Guideline*”) de $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2,5}$ e $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} para exposição média anual e de $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2,5}$ e $45\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} para exposição média em um período de 24 horas, sendo também apresentados objetivos intermediários para se atingir o nível final recomendado AQG. Estes novos valores para AQG representam uma redução adicional proposta por WHO (2021) frente aos níveis de AQG que estavam em voga anteriormente, dados por WHO (2005), que passaram a representar a meta intermediária 4 na nova revisão do guia. Os valores de cada etapa podem ser visualizados na Tabela 3.2, em conjunto com as recomendações para outros poluentes gasosos.

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), por meio da Resolução N° 491, de 19 de novembro de 2018 (CONAMA, 2018), estabeleceu os limites para os padrões de qualidade do ar. Os limites finais (PF) adotados tiveram como base os valores de AQG dados por WHO (2005), que, na nova revisão, referem-se à meta 4 de WHO (2021). Além dos valores finais PF almejados, CONAMA (2018) estabeleceu padrões de qualidade do ar intermediários (PI), como valores temporários, a serem cumpridos em etapas, apresentados na Tabela 3.3..

Atualmente encontra-se em voga a Etapa 1 (PI-1), que entrou em vigor na dada de publicação da referida Resolução N° 491 (CONAMA, 2018). Ela estabelece valor limite de $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2,5}$ e $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} para exposição média anual e de $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2,5}$ e $120\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} para exposição média em um período de 24 horas.

Tabela 3.2: Níveis recomendados (AQG) para os poluentes e metas intermediárias pelo guia de qualidade do ar da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2021).

Pollutant	Averaging time	Interim target				AQG level
		1	2	3	4	
$\text{PM}_{2,5}, \mu\text{g}/\text{m}^3$	Annual	35	25	15	10	5
	24-hour ^a	75	50	37.5	25	15
$\text{PM}_{10}, \mu\text{g}/\text{m}^3$	Annual	70	50	30	20	15
	24-hour ^a	150	100	75	50	45
$\text{O}_3, \mu\text{g}/\text{m}^3$	Peak season ^b	100	70	–	–	60
	8-hour ^a	160	120	–	–	100
$\text{NO}_2, \mu\text{g}/\text{m}^3$	Annual	40	30	20	–	10
	24-hour ^a	120	50	–	–	25
$\text{SO}_2, \mu\text{g}/\text{m}^3$	24-hour ^a	125	50	–	–	40
$\text{CO}, \text{mg}/\text{m}^3$	24-hour ^a	7	–	–	–	4

^a 99th percentile (i.e. 3–4 exceedance days per year).

^b Average of daily maximum 8-hour mean O_3 concentration in the six consecutive months with the highest six-month running-average O_3 concentration.

Tabela 3.3: Níveis recomendados (AQG) para os poluentes e metas intermediárias pela Resolução N° 491 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2018).

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1	PI-2	PI-3	PF	
		mg/m ³	m/m ³	mg/m ³	mg/m ³	ppm
Material Particulado - MP10	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual ¹	40	35	30	20	-
Material Particulado - MP2,5	24 horas	60	50	37	25	-
	Anual ¹	20	17	15	10	-
Dióxido de Enxofre - SO ₂	24 horas	125	50	30	20	-
	Anual ¹	40	30	20	-	-
Dióxido de Nitrogênio - NO ₂	1 hora ²	260	240	220	200	-
	Anual ¹	60	50	45	40	-
Ozônio - O ₃	8 horas ³	140	130	120	100	-
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual ¹	40	35	30	20	-
Monóxido de Carbono - CO	8 horas ³	-	-	-	-	9
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	-	-	-	240	-
	Anual ⁴	-	-	-	80	-
Chumbo - Pb ₅	Anual ¹	-	-	-	0,5	-
1 - média aritmética anual						
2 - média horária						
3 - máxima média móvel obtida no dia						
4 - média geométrica anual						
5 - medido nas partículas totais em suspensão						

No Estado de São Paulo os limites de poluentes foram estabelecidos pelo Decreto N° 59.113, de 23 de abril de 2013 (SÃO PAULO, 2013), que contempla metas intermediárias (MI) para três etapas MI1, MI2 e MI3, além de padrões finais objetivados (PF). Conforme pode-se ver na Tabela 5, retirada de CETESB (2022), os valores limites para os materiais particulados são os mesmos adotados por CONAMA (2018), apresentados na Tabela 4.

A etapa 1 (MI1) esteve vigente no Estado de São Paulo entre 24/04/2013 e 31/12/2021, tendo a Etapa 2 entrado em vigor a partir de 01/01/2022, através da Deliberação CONSEMA N° 4, de 19/05/2021 (CONSEMA, 2021), que utilizou como base um estudo técnico elaborado por CETESB (2021). Os valores vigentes para os materiais particulados, referentes à Etapa 2 (MI2), conforme destacados em vermelho na Tabela 5, são de 17 µg/m³ de PM_{2,5} e 35 µg/m³ de PM₁₀ para exposição média anual e de 50 µg/m³ de PM_{2,5} e 100 µg/m³ de PM₁₀ para exposição média em um período de 24 horas.

Os critérios para declaração de estados de Atenção, Alerta e Emergência em relação ao nível de qualidade do ar no Estado de São Paulo encontram-se detalhados no Anexo B, assim como a estrutura utilizada para o índice de qualidade do ar.

Tabela 3.4: Padrões de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2013).

Padrões Estaduais de Qualidade do Ar (Decreto Estadual nº 59113 de 23/04/2013)					
Poluente	Tempo de Amostragem	MI1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MI2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MI3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
partículas inaláveis (MP ₁₀)	24 horas MAA ¹	120	100	75	50
		40	35	30	20
partículas inaláveis finas (MP _{2,5})	24 horas MAA ¹	60	50	37	25
		20	17	15	10
dióxido de enxofre (SO ₂)	24 horas MAA ¹	60	40	30	20
		40	30	20	-
dióxido de nitrogênio (NO ₂)	1 hora MAA ¹	260	240	220	200
		60	50	45	40
Ozônio (O ₃)	8 horas	140	130	120	100
monóxido de carbono (CO)	8 horas	-	-	-	9 ppm
fumaça* (FMC)	24 horas MAA ¹	120	100	75	50
		40	35	30	20
partículas totais em suspensão* (PTS)	24 horas MGA ²	-	-	-	240
		-	-	-	80
Chumbo** (Pb)	MAA ¹	-	-	-	0,5

1 - Média aritmética anual.

2 - Média geométrica anual.

* Fumaça e Partículas Totais em Suspensão - parâmetros auxiliares a serem utilizados apenas em situações específicas, a critério da CETESB.

** Chumbo - a ser monitorado apenas em áreas específicas, a critério da CETESB.

Quanto aos valores limites de materiais particulados específicos para ambientes interiores, a Resolução RE-09 (ANVISA, 2003) estabelece a referência de 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de aerodispersóides totais no ar, como indicador do grau de pureza do ar e limpeza do ambiente climatizado. Dessa forma ela não realiza a distinção entre as concentrações por tamanhos das partículas.

A Norma NBR 16401-3 (ABNT, 2008), por sua vez, em seu Anexo B, apresenta valores com caráter informativo de concentrações consideradas aceitáveis por diversas entidades internacionais para diferentes poluentes gasosos no ambiente interno. Um limite aceitável para o PM10 seria de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Já para o PM2,5 não há um valor especificado.

Nos Estados Unidos, de forma similar, a Norma ASHRAE 62.1 (ASHRAE, 2013) apresenta valores informativos para concentrações de contaminantes em seu Anexo B, ressaltando que para casos em que os valores verificados no ambiente externo para os materiais particulados

PM10 e PM2,5 sejam superiores àqueles recomendados pela legislação local deve-se prever um sistema de filtragem ou de limpeza adequado no ar externo para reduzir os níveis de materiais particulados do ar de renovação antes que este adentre nos espaços ocupados.

3.4.2. Requisitos de filtragem

Quanto aos sistemas de filtragem de ar, normas nacionais e internacionais definem classes de filtragem mínimas recomendadas a serem utilizadas para cada tipo de aplicação. No presente item são apresentadas algumas das principais normas que abordam este assunto, realizando-se a análise e a comparação de seus principais requisitos.

No Brasil, a antiga Norma NBR 16101 (ABNT, 2012), especificava os métodos de testagem e critérios a serem utilizados para a determinação da eficiência de filtros de ar, das classes grosso, médio e fino, tomando como base a antiga Norma Europeia EN 779 (CEN, 2012), que ficou em vigor até 2018, tendo atualmente sido substituída pela nova Norma ISO 16890 (ISO, 2016),

A Norma NBR 16101 (ABNT, 2012) também não se encontra mais vigente, tendo sido cancelada em outubro de 2023 e substituída pela nova Norma NBRISO16890-1 (ABNT, 2018). Entretanto, como as classes de filtro mínimas recomendadas pela Norma NBR 16401-3 (ABNT, 2008) vigente no país são baseadas na classificação dada pela antiga NBR 16101 (ABNT, 2012), detalhamos a seguir as suas informações mais relevantes.

Para realizar os testes de eficiência dos filtros médios (classes M) e finos (classes F), a Norma NBR 16101 (ABNT, 2012) estabelecia um aerossol de ensaio de referência, com partículas de diâmetro de 0,4 μm , sendo os filtros de ar classificados de acordo com a eficiência de retenção de partículas obtida nos testes com este aerossol, conforme faixas de eficiência da Tabela 3.5.

Para os filtros grossos (classe G), por sua vez, era empregado pela Norma NBR 16101 (ABNT, 2012) como pó de carregamento um pó de ensaio sintético com suas características conforme determinadas na Norma ASHRAE 52.2 (ASHRAE, 2017), com o qual eram realizados testes de eficiência gravimétrica de filtragem em relação à retenção de pó (arrestância média). Os filtros de ar grossos eram classificados com base em sua arrestância, conforme apresentado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Classificação dos filtros conforme Norma NBR 16101 (ABNT, 2012), baseada na EN 779 (CEN, 2012).

Grupo	Classe	Perda de pressão final Pa	Arrestância média (A_m) %	Eficiência média (E_m) para partículas de 0,4 μm %	Eficiência mínima (E_m) ^b para partículas de 0,4 μm %
Grossos	G1	250	$50 \leq E_g < 65$	-	-
	G2	250	$65 \leq E_g < 80$	-	-
	G3	250	$80 \leq E_g < 90$	-	-
	G4	250	$90 \leq E_g$	-	-
Médios	M5	450	-	$40 \leq E_f < 60$	-
	M6	450	-	$60 \leq E_f < 80$	-
Finos	F7	450	-	$80 \leq E_f < 90$	≥ 35
	F8	450	-	$90 \leq E_f < 95$	≥ 55
	F9	450	-	$95 \leq E_f$	≥ 70
a	As características da poeira atmosférica variam amplamente em comparação com as características do pó de carregamento usado nos ensaios. Em razão disso, os resultados dos ensaios não proveem uma base para prever tanto o desempenho operacional quanto a vida útil. A redução da carga estática do meio filtrante ou o desprendimento de partículas ou fibras podem também afetar negativamente a eficiência.				
b	A eficiência mínima (E_m) para partículas de 0,4 μm é a menor eficiência verificada no decorrer de qualquer uma das etapas do procedimento de ensaio (eficiência inicial do filtro e/ou da amostra de meio filtrante, eficiência do meio filtrante carregado ou descarregado eletrostaticamente).				

Com base nas classificações dos filtros da Tabela 3.5, a Norma NBR 16401-3 (ABNT, 2008) determina classes de filtragem mínimas recomendadas para algumas aplicações, conforme apresentado na Tabela 3.6. Estas classes estipuladas são válidas para qualquer tipo de sistemas de condicionamento de ar, com exceção de sistemas unitários isolados para conforto cuja capacidade total for inferior a 10 kW.

Para sistemas de conforto constituídos de unidades de tratamento de ar de pequeno porte, que não comportem filtros com a classe de filtragem recomendada, o uso de filtros de classe G3 é admissível, desde que o ar exterior seja suprido por sistema complementar, provido de filtragem com a classe recomendada na Tabela 3.6 (ABNT, 2008).

Para casos em que o ar externo é admitido por sala que serve de *plenum* para o condicionador ou em que o ar externo é suprido através de dutos a diversos condicionadores, por meio de um ventilador central, a Norma NBR16401-3 (ABNT, 2008) recomenda ainda a instalação de um pré-filtro, com classe mínima G4, a ser instalado junto à veneziana de captação de ar.

Conforme pode ser visualizado na Tabela 3.6, a classe de filtragem mínima recomendada para salas de aula é a classe F5, que, atualizando para a nomenclatura atualizada dada pela Norma NBR 16101 (ABNT, 2012), trata-se de um filtro com classe mínima M5.

Tabela 3.6: Classes mínimas de filtragem por aplicação estipuladas pela NBR 16401-3 (ABNT, 2008).

Aplicação típica	Classe
Supermercado, <i>mall</i> de centros comerciais, agências bancárias e de correios, lojas comerciais e de serviços	G4
Escritórios, sala de reunião, CPD, sala de digitação, <i>call center</i> , consultórios	F5
Aeroporto – saguão, salas de embarque	F5
Aeroporto - torre de controle	G3 + F6
Biblioteca, museu – áreas do público	F5
Biblioteca, museu – exposição e depósito de obras sensíveis	G3 + F8
Hotéis 3 estrelas ou mais - apartamentos, <i>lobby</i> , salas de estar, salões de convenções	F5
Hotéis - outros, motéis - apartamentos	G4
Teatro, cinema, auditório, locais de culto, sala de aula	F5
Lanchonete, cafeteria	G4
Restaurante, bar, salão de coquetel, discoteca, danceteria, salão de festas, salão de jogos	F5
Ginásio (áreas do público), <i>fitness center</i> , boliche, jogos eletrônicos	G4
Centrais telefônicas – sala de comutação	G3 + F6
Residências	G3
Sala de controle – ambiente eletrônico sensível	G3 + F6
Impressão – litografia, <i>offset</i>	G3 + F7
Impressão - processamento de filmes	G3 + F8

A Resolução RE-09 (ANVISA, 2003), por sua vez, estipula apenas ser obrigatória a utilização de filtros de classe mínima G1 na captação de ar exterior e filtros de classe mínima G3 nos condicionadores de sistemas centrais, com o objetivo de reduzir o acúmulo de sujidades nos dutos e reduzir os níveis de material particulado no ar insuflado. Dessa forma, ela não faz distinção da classe de filtragem por tipo de aplicação, conforme realizado pela Norma NBR 16401 (ABNT, 2008).

Internacionalmente, a Norma europeia EN 13779 (CEN, 2011), que estava válida até 2017, introduziu um tipo de abordagem diferente para a definição das

classes de filtragem mínimas a serem empregadas, variando-as em função da intensidade de poluição do ar externo do local e do nível de qualidade do ar interior requerido para um dado ambiente. Conforme detalhado em REHVA (2011), as classificações para o externo do local podem ser adotadas conforme os seguintes parâmetros:

- **ODA 1:** ar puro, temporariamente com poeiras, por exemplo pólen. Aplicável quando os níveis de concentração de poluentes no ar exterior atendem aos padrões requeridos pela OMS (WHO, 2021) e demais normas locais de qualidade do ar. Exemplo dessa aplicação são áreas rurais com ausência de poluição específica;
- **ODA 2:** ar exterior com altas concentrações de partículas ou poluentes gasosos. Aplicável quando os níveis de concentração de poluentes no ar exterior excedem aos padrões requeridos pela OMS (WHO, 2021) e demais normas locais de qualidade do ar

por um fator de até 1,5. Exemplo dessa aplicação são áreas urbanas pequenas, sem concentração de indústrias;

- **ODA 3:** ar exterior com muito altas concentrações de partículas ou poluentes gasosos. Aplicável quando os níveis de concentração de poluentes no ar exterior excedem aos padrões requeridos pela OMS (WHO, 2021) e demais normas locais de qualidade do ar por um fator maior que 1,5. Exemplo dessa aplicação são áreas industriais e centros de cidades com tráfego intenso.

O ambiente interno, por sua vez, pode ser classificado através de quatro categorias, em ordem crescente de qualidade do ar requerida, sendo **IDA 1** (alta), **IDA 2** (média), **IDA 3** (moderada) e **IDA 4** (baixa). Na Tabela 3.7 são apresentadas as classes de filtragem mínimas recomendadas pela antiga Norma EN 13779 (CEN, 2011), para cada conjunto de IDA e ODA.

Tabela 3.7: Classes mínimas de filtragem recomendadas pela Norma EN 13779 (CEN, 2011).

Qualidade do Ar Exterior	IDA 1 (Alta)	IDA 2 (Média)	IDA 3 (Moderada)	IDA 4 (Baixa)
ODA 1 (ar puro)	F9	F8	F7	M5
ODA 2 (poeiras)	F7 + F9	M6 + F8	M5 + F7	M5 + M6
ODA 3 (concentração muito altas de poeiras ou gases)	F7 + GF* + F9	F7 + GF* + F9	M5 + F7	M5 + M6
GF* = Filtros para Gases				

Com base na Tabela 3.7, para o tipo de ambiente estudado no presente trabalho, localizado na cidade de São Paulo, admitindo-se um ar externo com classe ODA-3 e requisito de qualidade do ar interior moderada (IDA-3), verifica-se que o nível de filtragem requerido pela EN 13779 (CEN, 2011) é obtido utilizando-se dois filtros em série, classes M5 + F7. Ela é, assim, mais restritiva do que a Norma NBR 16401 (ABNT, 2008), que estipula a utilização apenas de um filtro M5 para o caso estudado da sala de aula, conforme Tabela 3.6.

A Norma ASHRAE 52.2 (ASHRAE, 2017), por sua vez, realiza uma classificação distinta dos filtros de ar, na qual são avaliados os níveis de eficiência dos elementos filtrantes para três faixas distintas de tamanho de contaminantes, além dos testes de arrestância realizados para as menores classes de filtragem. Através dos critérios de eficiência adotados, os filtros de ar são divididos em 16 classes, em função do MERV (Valor mínimo relatado de eficiência ou no inglês “*Minimum Efficiency Reporting Value*”), conforme detalhado na Tabela 3.8.

Apesar de os critérios de eficiência para a classificação dos filtros de ar utilizados em ABNT (2012) e ASHRAE (2017) serem distintos, na Tabela 3.9 pode ser verificada uma comparação aproximada entre as classes de filtragem definidas pelas duas normas, com a disponibilização também à esquerda da nomenclatura antiga utilizada em ABNT (2008).

Em relação aos níveis mínimos de filtragem a serem utilizados nas instalações para aceitável qualidade do ar, a Norma ASHRAE 62.1 (ASHRAE, 2013), utilizando como base os critérios de classificação de ASHRAE (2017), estipula o emprego de uma filtragem com classe mínima MERV 8 a montante de serpentinas de resfriamento ou outros dispositivos com superfícies molhadas através do qual o ar é fornecido a um espaço ocupado. Utilizando-se a comparação disponível na Tabela 3.9, verifica-se que esse requisito equivale aproximadamente a um filtro classe G4 pela NBR 16101 (ABNT, 2012). Este requisito é inferior aos recomendados pela NBR 16401 (ABNT, 2008) e EN 13779 (CEN, 2011) para o caso analisado.

Tabela 3.8: Classificação dos filtros de ar conforme ASHRAE 52.2 pelo MERV (ASHRAE, 2017).

Standard 52.2 Minimum Efficiency Reporting Value (MERV)	Composite Average Particle Size Efficiency, % in Size Range, μm			Average Arrestance, %
	Range 1 0.30 to 1.0	Range 2 1.0 to 3.0	Range 3 3.0 to 10.0	
1	N/A	N/A	$E_3 < 20$	$A_{avg} < 65$
2	N/A	N/A	$E_3 < 20$	$65 \leq A_{avg}$
3	N/A	N/A	$E_3 < 20$	$70 \leq A_{avg}$
4	N/A	N/A	$E_3 < 20$	$75 \leq A_{avg}$
5	N/A	N/A	$20 \leq E_3$	N/A
6	N/A	N/A	$35 \leq E_3$	N/A
7	N/A	N/A	$50 \leq E_3$	N/A
8	N/A	$20 \leq E_2$	$70 \leq E_3$	N/A
9	N/A	$35 \leq E_2$	$75 \leq E_3$	N/A
10	N/A	$50 \leq E_2$	$80 \leq E_3$	N/A
11	$20 \leq E_1$	$65 \leq E_2$	$85 \leq E_3$	N/A
12	$35 \leq E_1$	$80 \leq E_2$	$90 \leq E_3$	N/A
13	$50 \leq E_1$	$85 \leq E_2$	$90 \leq E_3$	N/A
14	$75 \leq E_1$	$90 \leq E_2$	$95 \leq E_3$	N/A
15	$85 \leq E_1$	$90 \leq E_2$	$95 \leq E_3$	N/A
16	$95 \leq E_1$	$95 \leq E_2$	$95 \leq E_3$	N/A

Tabela 3.9: Comparação aproximada entre classificações de filtros de ar pela NBR 16101 e ASHRAE 52.2 (AIRLINK, 2022)

Tabela de Classificação de Filtros de Ar Grossos, Médios e Finos											
NBR 16401-3:2008		NBR 16101:2012						ANSI / ASHRAE 52.2			
Grupo	Classe	Grupo	Classe	Perda de pressão final (Pa)	Arrestância média (A...) (%)	Eficiência média (E...) para partículas de 0,4 μ (%)	Eficiência mínima para partículas de 0,4 μ (%)	Classe	Eficiência média em função da faixa de partículas		
									MERV	E1 0,3 – 1,0 μ	E2 1,0 – 3,0 μ
Grossos	G1	Grossos	G1	250	50 ≤ Eg < 65	-	-	1			< 20 %
	G2		G2	250	65 ≤ Eg < 80	-	-	2			< 20 %
								3			< 20 %
								4			< 20 %
								5			20 – 35%
	G3		G3	250	80 ≤ Eg < 90	-	-	6			35 – 50%
								7			50 – 70%
	G4		G4	250	90 ≤ Eg	-	-	8			> 70%
9								< 50%	> 85%		
10								50 – 65%	> 85%		
11								65 – 80%	> 85%		
12								> 80%	> 90%		
Finos	F5	Médios	M5	450	-	40 ≤ Ef < 60	-	13	< 75%	> 90%	> 90%
	F6		M6	450	-	60 ≤ Ef < 80	-	14	75% – 85%	> 90%	> 90%
								15	85 – 95%	> 90%	> 90%
	F7	Finos	F7	450	-	80 ≤ Ef < 90	35	13	< 75%	> 90%	> 90%
	F8		F8	450	-	90 ≤ Ef < 95	55	14	75% – 85%	> 90%	> 90%
F9	F9		450	-	95 ≤ Ef	70	15	85 – 95%	> 90%	> 90%	

Ainda na Norma ASHRAE 62.1 (ASHRAE, 2013), para casos em que o nível de particulados no ar externo excedam aos padrões recomendados pelas legislações locais, deve-se prever um sistema de filtragem para reduzir os níveis de materiais particulados do ar de renovação antes que este adentre em espaços ocupados, sendo recomendadas para estes filtros a classe MERV 5 quando o PM₁₀ excede os limites e MERV 11 para o caso de excesso de PM_{2,5}. Com base na Tabela 3.9, esses níveis equivalem aproximadamente às classes G3 e M6 da NBR 16101 (ABNT, 2012). Este requisito ultrapassa, portanto, o requerido para salas de aula pela NBR 16101 (ABNT, 2012), para casos com PM_{2,5} fora dos padrões no ambiente externo.

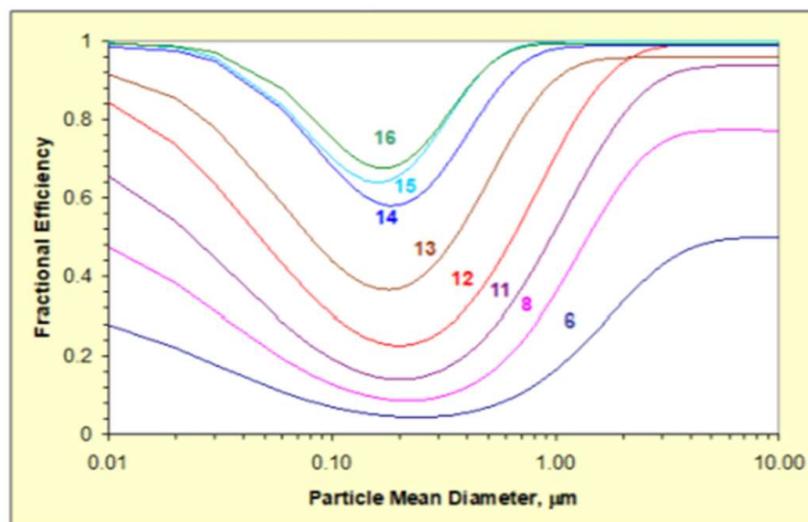
ASHRAE (2019) apresenta requisitos específicos para salas de aula, com níveis de filtragem recomendados de MERV 6 a MERV 8. Em função da pandemia do coronavírus e da retomada gradual das atividades em ambientes ocupados, ASHRAE (2022) apresenta um guia com diversas recomendações para a reabertura de escolas e universidades. O objetivo proposto é o de auxiliar os projetistas a realizarem o “*retrofit*” e planejarem as novas instalações visando melhorar a qualidade do ar interno e retardar a transmissão do vírus pelos sistemas AVAC. Destacam-se os seguintes métodos e objetivos principais ressaltados neste guia:

- O esforço do projetista deve ser de mitigar o risco de transmissão de patógenos no ar por meio da combinação de estratégias, incluindo maior ventilação, melhor filtragem, melhor distribuição de ar ou uso de outras tecnologias de limpeza ou tratamento do ar;
- Opções de controle devem ser selecionadas para promover a redução de exposição ao vírus desejada, enquanto minimiza o aumento de consumo de energia associado;
- O projetista também deve se preocupar em manter as condições de conforto térmico no interior dos ambientes, conforme definidas pela temperatura e umidade relativa de referência do projeto.

Uma das recomendações fornecidas em ASHRAE (2022) é de selecionar o nível de filtragem máximo que a capacidade dos equipamentos e do sistema de condicionamento de ar existente na instalação permita, em função do aumento de perda de carga provocado por um filtro mais eficiente. Esse filtro deve ser capaz de ser suportado pelo ventilador do equipamento, em função da análise de sua curva e de seu ponto de operação atual. O nível mínimo de filtragem recomendado, garantindo que a perda de carga seja inferior à capacidade dos ventiladores é MERV 13, ou, se possível, MERV 14. Utilizando a Tabela 3.9, estes níveis corresponderiam respectivamente às classes F7 e F8, com base na classificação da NBR 16101 (ABNT, 2012).

No Gráfico 3.1 pode-se visualizar curvas típicas de eficiência dos filtros em função do tamanho dos materiais particulados, onde é possível ter uma boa percepção da ordem de grandeza do aumento de eficiência de filtragem quando se substitui um filtro de classe MERV 6 para um de classe MERV 13, ou ainda MERV 14, conforme recomendado por ASHRAE (2022) para a retomada da ocupação de escolas e universidades.

Gráfico 3.1: Eficiência de filtros MERV em função do tamanho das partículas (ASHRAE, 2022).



Conforme ilustrado no Gráfico 3.1, a eficiência de filtragem de uma dada classe varia de acordo com o tamanho das partículas. Um filtro de menor classe de filtragem, apesar de muitas vezes não atingir os requisitos de eficiência mínima estipulada, pode ainda contribuir, mesmo que em menor proporção, para a remoção de particulados de menor diâmetro que se encontram presente no ar insuflado. Com a nova Norma ISO 16890 (ISO, 2016) esse efeito já é refletido diretamente na classificação dos filtros, dada em função de sua eficiência para os diferentes tamanhos de materiais particulados.

Quanto à distribuição dos materiais particulados no ar de renovação, em função do tamanho das partículas, suas características podem variar de acordo com as condições do local onde o ambiente está instalado. Um detalhamento das características médias do ar externo em diversas cidades ao redor do mundo, com exemplos de filtros MERV recomendados, pode ser verificado em estudo realizado por Stephens et al. (2016), enquanto uma análise das massas específicas dos materiais particulados em diferentes regiões encontra-se detalhada no Apêndice C.

A variação de distribuições de particulados nos ambientes externos de cada região com as diferentes capacidades de filtragem dos elementos filtrantes conforme o tamanho das partículas indica a dificuldade em se realizar uma padronização da determinação de uma classe de filtragem específica para uma dada aplicação, independentemente do local onde está inserido o sistema e dos objetivos de qualidade do ar requeridos para o sistema.

Tal variedade de possibilidades para o ar externo e interno para a determinação dos filtros a serem aplicados já havia sido inicialmente abordada na Norma EN 13779 (CEN, 2011), com a introdução dos conceitos de ODA e IDA, detalhados na Tabela 3.7. Desenvolvendo este conceito e incluindo a determinação da eficiência do sistema de filtragem como um todo, com diversas possibilidades de combinação de filtros, a Norma EN 16798-3 (CEN, 2017), que revisou a antiga Norma EN 13779 (CEN, 2011), introduziu alterações nas recomendações para os sistemas de filtragem apresentadas anteriormente na Tabela 3.7.

As condições do ar interior (IDA - *Indoor Air*) foram substituídas pelas condições do ar insuflado (SUP - *Supply Air*), como referência para as recomendações de filtragem para as diferentes condições do ar externo local (ODA - *Outdoor Air*). Foram definidos cinco níveis de qualidade requerida no ar insuflado, conforme apresentado na Tabela 3.10. Os critérios para verificação de qual classe aplicar são descritos por CEN (2017) em seu Anexo B.

Tabela 3.10: Critérios de classificação do ar insuflado, conforme Norma EN 16798-3 (CEN, 2017).

Nível do Ar Insuflado	Concentração de Poluentes*	Fator sobre Padrão Recomendado**
SUP 1	Muito Baixa	0,25
SUP 2	Baixa	0,50
SUP 3	Média	0,75
SUP 4	Alta	1,0
SUP 5	Muito Alta	1,5

(*): Concentração de materiais particulados e/ou gases.
(**) Fator da concentração de poluentes verificada no ar insuflado sobre os padrões requeridos pela OMS (WHO, 2021) e demais normas locais de qualidade do ar.

Utilizando este conceito da qualidade do ar no insuflamento (SUP) a Norma EN 16798-3 (CEN, 2017) propõe níveis de eficiência mínima para o sistema de filtragem projetado em função dos níveis de contaminantes no ar externo local (ODA), conforme apresentado na Tabela 3.11. Vale-se ressaltar que são tomadas como base as eficiências calculadas conforme método de ensaio proposto pela Norma EN 779 (CEN, 2012), utilizado também na Norma NBR 16101 (ABNT, 2012) e não os valores de eficiência para cada tamanho de particulado proposto pela nova Norma ISO 16890 (ISO, 2016).

Tabela 3.11: Eficiências mínimas de filtragem em função das condições do ar externo e do insuflamento dadas pela Norma EN 16798-3 (CEN, 2017).

Outdoor air quality	Supply air class				
	SUP 1	SUP 2	SUP 3	SUP 4	SUP 5
ODA (P) 1	88 % ^a	80 % ^a	80 % ^a	80 % ^a	Not specified
ODA (P) 2	96 % ^a	88 % ^a	80 % ^a	80 % ^a	60 %
ODA (P) 3	99 % ^a	96 % ^a	92 % ^a	80 % ^a	80 %

^a Combined average filtration efficiency over a single or multiple stage filtration in accordance to average filtration efficiency specified in EN 779.

O cálculo da eficiência de filtragem total (E_t) requerida na Tabela 3.11, para uma combinação de filtros em série, pode ser realizado através da Equação (3.2), adaptada de REHVA (2018), onde (E_j) é eficiência dada por cada etapa “j” dos “n” estágios de filtragem.

$$E_t = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - E_j) \quad (3.2)$$

A Tabela 3.12 apresenta um exemplo de combinações de filtros de ar com base na classificação apresentada na Tabela 3.6, utilizada pelas Normas EN 779 (CEN, 2012) e NBR 16101 (ABNT, 2012), para atender às eficiências de filtragem mínimas dadas na Tabela 3.11. Os padrões de referência para os poluentes foram adotados a partir do nível final AQG de WHO (2005), que atualmente se refere à meta intermediária da etapa 4 de WHO (2021).

Conforme a Tabela 3.12, considerando-se uma instalação na cidade de São Paulo, adotada como ODA 3 e para um nível de ar insuflado médio SUP-3, uma combinação de filtros recomendada pela EN 16798-3 (CEN, 2017) seria de classes M6+F7. Esse requisito é um pouco superior que as classes M5+F7 recomendadas pela antiga EN 13779 (CEN, 2011) para ODA-3 e IDA-3, conforme apresentado na Tabela 3.7.

Tabela 3.12: Exemplos de combinação de filtros para atender às eficiências mínimas recomendadas pela Norma EN 16798-3 (CEN, 2017).

Outdoor air quality					
	SUP 1	SUP 2	SUP 3	SUP 4	SUP 5
ODA 1	M5+F7	F7	F7	F7	-
ODA 2	F7 + F7	M5 + F7	F7	F7	- G3,M5?
ODA 3	F7 + F9	F7 + F7	M6 + F7	F7	F7

Como apontado por Trox (2017), contudo, a classificação dos filtros de ar realizada através da Norma EN 779 (CEN, 2012), na qual baseou-se também a NBR 16101 (ABNT, 2012), não representa um retrato realista das condições de composição de materiais particulados a que os elementos filtrantes serão submetidos em sua operação, uma vez que sua testagem é baseada em valores médios de eficiência obtidos utilizando-se uma partícula de referência com tamanho padronizado de 0,4 μm .

Neste sentido, a Norma ISO 16890-1 (ISO, 2016), que substituiu a partir de 2018 a Norma EN 779 (CEN, 2012), introduziu um novo sistema de classificação dos filtros de ar. Neste sistema os filtros são testados utilizando-se uma combinação de partículas com diferentes tamanhos e são classificados de acordo com a eficiência obtida para cada classe de particulados (PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ e PM_1), estando de acordo, portanto, com as nomenclaturas adotadas pelos principais padrões e recomendações das agências de saúde para concentrações limites de particulados, conforme detalhado no Item 3.4.1.

Esta nova metodologia de testes e de classificação dos filtros de ar introduzida por ISO (2016) representa uma importante ferramenta para os projetistas de sistemas de AVAC, conforme

detalhado em Tronville & Rivers (2016). Com as mudanças promovidas por esta Norma, o projeto eficiente de um sistema passará a incluir a qualidade do ar local como um dos parâmetros, cujos dados podem ser medidos através de estações de monitoramento. Dessa forma, em última análise, a qualidade do ar local irá determinar o filtro a ser empregado, conforme ressaltado por Trox (2017).

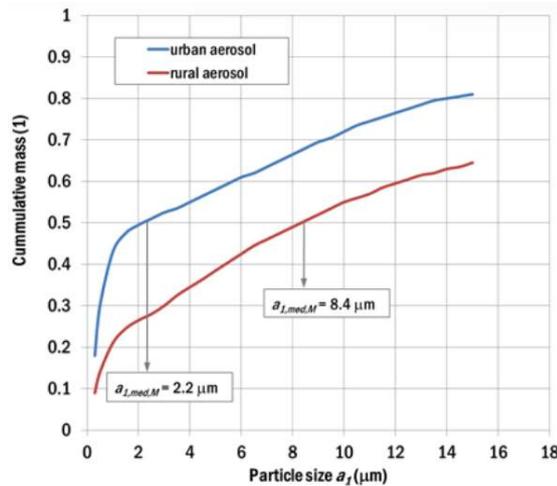
Os principais subgrupos em que os filtros são classificados, de acordo com ISO (2016), e suas respectivas eficiências mínimas para as classes de particulados são apresentados na Tabela 3.13. O cálculo da eficiência dos filtros para cada classe é realizado conforme duas distribuições médias de particulados, para áreas urbanas e áreas rurais, apresentadas no Gráfico 3.2.

Conforme as recomendações da ISO 16890 (ISO, 2016), os filtros que são mais utilizados para a separação das frações de partículas PM_1 e $PM_{2,5}$ devem ser classificados de acordo com a distribuição granulométrica da poeira atmosférica em áreas urbanas. Os filtros destinados principalmente à separação da fração de material particulado PM_{10} são classificados de acordo com o tamanho das partículas do pó em áreas rurais. Os valores de eficiência calculados de $ePM_1(\%)$ e $ePM_{2,5}(\%)$ da Tabela 3.13 são, portanto, baseados na curva de distribuição de um aerossol urbano, enquanto o valor de $ePM_{10}(\%)$ é baseado na curva de distribuição de um aerossol rural. Os valores de $ePM_x(\%)$ são arredondados para baixo para múltiplos de 5% (REHVA, 2021).

Tabela 3.13: Classificação de filtros de acordo com a Norma ISO 16890 (adaptado de REHVA, 2021).

Grupos de Filtros	Requisitos Mínimos de Filtragem			Classe do Valor Relatado	Nomenclatura Subgrupos
	ePM1	ePM2.5	ePM10		
ISO coarse	-	-	< 50%	Arrestância inicial com pó sintético	ISO Coarse (Am)
ISO ePM10	-	-	> 50%	ePM10 ($0,3 \leq x \leq 10\mu m$)	ISO ePM10 (Em)
ISO ePM2.5	-	> 50%	-	ePM2.5 ($0,3 \leq x \leq 2,5\mu m$)	ISO ePM2.5 (Em)
ISO ePM1	> 50%	-	-	ePM1 ($0,3 \leq x \leq 1,0\mu m$)	ISO ePM1 (Em)
<p>Am: Arrestância gravimétrica média dada em múltiplos de 5%, sendo $5\% \leq Am \leq 95\%$ Em: Eficiência média para a classe dada em múltiplos de 5%, sendo $50\% \leq Em \leq 95\%$</p>					

Gráfico 3.2: Curvas de distribuição cumulativa média de massa por tamanho dos aerossóis para áreas urbanas e rurais (HEMERKA e VYBÍRAL, 2021).



Uma comparação entre as eficiências de filtragem dos filtros certificados pela EN 779 (CEN, 2012), para cada tamanho de particulados da ISO 16890 (ISO, 2016), pode ser visualizada na Tabela 3.14. Esse comparativo foi desenvolvido pela Eurovent Association (Eurovent, 2018), tomando como base os dados de eficiência coletados em testes padronizados realizados por diversos fabricantes de filtros certificados pela associação.

Tabela 3.14: Comparativo da eficiência medida em ensaios com filtros certificados pela EN 779 (CEN, 2012) para os grupos da ISO 16890 (ISO, 2016) de particulados (EUROVENT, 2018).

EN 779: 2012	EN ISO 16890 – range of actual measured average efficiencies		
Filter class	ePM ₁	ePM _{2,5}	ePM ₁₀
M5	5% - 35%	10% - 45%	40% - 70%
M6	10% - 40%	20% - 50%	60% - 80%
F7	40% - 65%	65% - 75%	80% - 90%
F8	65% - 90%	75% - 95%	90% - 100%
F9	80% - 90%	85% - 95%	90% - 100%

A Tabela 3.15 apresenta uma atualização dos requisitos mínimos de filtragem estabelecidos pela Norma EN 16798-3 (CEN, 2017), em função das condições de poluentes do ar externo (ODA) e do ar insuflado (SUP), tomando como base a nova norma de testagem e classificação dos filtros ISO 16890 (ISO, 2016). Para os valores padrão dos poluentes foi utilizado o nível final AQG de WHO (2005), que atualmente se refere à meta intermediária da etapa 4 de WHO (2021).

Os valores de eficiência mínima recomendados pela Norma EN 16798-3 (CEN, 2017) para os filtros antigos da Norma EN 779 (CEN, 2012), baseados no teste realizado com partículas padrão de 0,4 μm , foram apresentados na Tabela 3.11. Comparando-se com a Tabela 3.15, pode-se visualizar como este novo conceito de classificação dos filtros introduzido pela ISO 16890 (ISO, 2016) aproximou a eficiência fornecida pelos testes com os padrões utilizados para o ar externo, de limites de poluentes em função dos tamanhos das partículas.

Tabela 3.15: Eficiências mínimas de filtragem dadas pela Norma EN 16798-3 (CEN, 2017) atualizados para grupos da ISO 16890 (ISO, 2016) de particulados (EUROVENT, 2018).

OUTDOOR AIR			SUPPLY AIR				
			SUP 1*	SUP2*	SUP3**	SUP4	SUP5
			PM _{2,5} ≤ 2.5 PM ₁₀ ≤ 5	PM _{2,5} ≤ 5 PM ₁₀ ≤ 10	PM _{2,5} ≤ 7.5 PM ₁₀ ≤ 15	PM _{2,5} ≤ 10 PM ₁₀ ≤ 20	PM _{2,5} ≤ 15 PM ₁₀ ≤ 30
Category	PM _{2,5}	PM ₁₀	ePM ₁	ePM ₁	ePM _{2,5}	ePM ₁₀	ePM ₁₀
ODA 1	≤ 10	≤ 20	70%	50%	50%	50%	50%
ODA 2	≤ 15	≤ 30	80%	70%	70%	80%	50%
ODA 3	> 15	> 30	90%	80%	80%	90%	80%

As eficiências mínimas fornecidas pela Tabela 3.15 podem também serem obtidas através de uma combinação de estágios de filtragem. Neste caso, o cálculo do valor da eficiência total do conjunto pode ser realizado através do emprego da Equação (3.2), aplicada à cada diâmetro de particulado. A Tabela 3.16 apresenta exemplos de algumas diferentes combinações de filtro e pré-filtro que podem ser utilizadas para atender aos objetivos dados pela Norma EN 16798-3 (CEN, 2017).

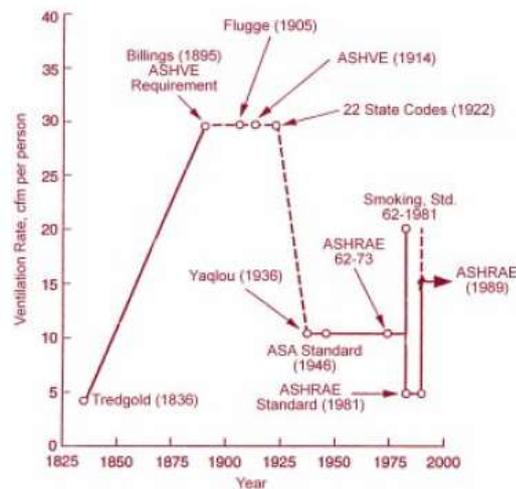
Tabela 3.16: Exemplos de combinação de filtros para atender às eficiências mínimas da Norma EN 16798-3 (CEN, 2017) através de estágios de filtragem (EUROVENT, 2018).

Outdoor air quality		Supply air quality				
		SUP1	SUP2	SUP3	SUP4	SUP5
ODA 1	example 1	ePM ₁₀ 50% + ePM ₁ 60%	ePM ₁ 50%	ePM _{2,5} 50%	ePM ₁₀ 50%	ePM ₁₀ 50%
	example 2	ePM ₁ 70%	-	-	-	-
ODA 2	example 1	ePM _{2,5} 50% + ePM ₁ 60%	ePM ₁₀ 50% + ePM ₁ 60%	ePM ₁ 50%	ePM _{2,5} 50%	ePM ₁₀ 50%
	example 2	ePM ₁ 80%	ePM ₁ 70%	ePM _{2,5} 70%	ePM ₁₀ 80%	-
ODA 3	example 1	ePM _{2,5} 50% + ePM ₁ 80%	ePM _{2,5} 50% + ePM ₁ 60%	ePM ₁₀ 50% + ePM ₁ 60%	ePM ₁ 50%	ePM _{2,5} 50%
	example 2	ePM ₁ 90%	ePM ₁ 80%	ePM _{2,5} 80%	ePM ₁₀ 90%	ePM ₁₀ 80%

3.5. Vazão de Ar Externo

Algumas das principais normas e regulamentações nacionais e internacionais sobre o projeto de sistemas AVAC apresentam recomendações de valores de vazão mínima para o ar externo a ser insuflado em um dado ambiente. Estas vazões recomendadas variaram muito ao longo do tempo nos últimos séculos, conforme estudo histórico realizado por Jansen (1999), que se encontra sintetizado no Gráfico 3.3.

Gráfico 3.3: Evolução da taxa de ventilação mínima recomendada ao longo do tempo (JANSEN, 1999).



Weeler (1999) também apresenta uma análise histórica da evolução das recomendações para qualidade do ar interior (QAI) ao longo do século XX, com as mudanças da sociedade e seus efeitos sobre os critérios para qualidade do ar definidos em cada época.

3.5.1. Requisitos de vazão

No Brasil, a Resolução RE-09 (ANVISA, 2003) estipula o valor de taxa de renovação de ar mínima requerida para ambientes climatizados de 27 m³/hora/pessoa. Uma exceção é dada para os casos específicos de ambientes com alta rotatividade de pessoas, para os quais a taxa de renovação de ar mínima estipulada é de 17 m³/hora/pessoa. Deve-se também atender o limite de concentração de dióxido de carbono (CO₂) estipulado, conforme apresentado no item 3.3.1

A Norma NBR 16.401-3 (ABNT, 2008), por sua vez, propõe o cálculo da vazão através da Equação (3.3), onde V_{ef} é a vazão efetiva de ar exterior, expressa em l/s, P_z o número máximo de pessoas na zona de ocupação e A_z a área útil ocupada.

$$V_{ef} = P_z * F_p + A_z * F_A \quad (3.3)$$

Os coeficientes F_p e F_A são referentes aos ocupantes e à área do ambiente, respectivamente. Seus valores são fornecidos para cada tipo de aplicação. Na Tabela 3.17 têm-se um recorte dos valores recomendados para estabelecimentos de ensino, considerando-se três diferentes níveis de ventilação, conforme descrito em NBR 16.401-3 (ABNT, 2008), sendo:

- **Nível 1:** nível mínimo de vazão de ar exterior para ventilação;
- **Nível 2:** nível intermediário de vazão de ar exterior para ventilação;
- **Nível 3:** vazão de ar exterior para ventilação que, segundo estudos, existem evidências de redução de reclamações e manifestações alérgicas.

Tabela 3.17: Fatores recomendados para cálculo da vazão de ar externo para estabelecimentos de ensino pela NBR 16.401-3 (ABNT, 2008).

Local	D pessoas/ 100 m ²	Nível 1		Nível 2		Nível 3		Exaustão mecânica L/s* m ^{2 a}
		F _p L/s*pess.	F _a L/s*m ²	F _p L/s*pess.	F _a L/s*m ²	F _p L/s*pess.	F _a L/s*m ²	
Estabelecimentos de ensino								
Sala de aula	35	5	0,6	6,3	0,8	7,5	0,9	--
Laboratório de informática	25	5	0,6	6,3	0,8	7,5	0,9	--
Laboratório de ciências	25	5	0,9	6,3	1,1	7,5	1,4	5,0

A título de ilustração, considerando-se o exemplo de um dos ambientes estudados no presente trabalho, referente à Sala de Aula A2 da Escola Politécnica (EPUSP), detalhado no item 4.3.1, adotando-se uma ocupação de 40 pessoas em um dado evento, obtém-se, através da Resolução 09 (ANVISA.2003), a vazão mínima requerida de 1.080 m³/h. Já pela Norma NBR 16.401-3 (ABNT, 2008), os valores obtidos para os três níveis de ventilação propostos (1, 2 e 3) são de 1.141, 1.468 e 1.711 m³/h respectivamente, o que representa aumentos de 5,6%, 36% e 58% em relação ao recomendado por ANVISA (2003).

O valor obtido para a vazão efetiva (V_{ef}) através da Equação (3.3), deve ser ainda corrigido por um fator ε_v , referente à eficiência da distribuição de ar na zona de ocupação, conforme a Equação (3.4), para obter-se a vazão de ar exterior (V_z) a ser fornecida para a zona de ocupação. Para um sistema com insuflação de ar frio por difusores no teto, conforme o ambiente da Sala A2 estudado, a eficiência fornecida pela Norma NBR 16.401-3 (ABNT, 2008) é igual a 1,0. Um estudo detalhado sobre a eficiência de ventilação para diferentes configurações de ambientes e sistemas de distribuição de ar pode ser verificado em REHVA (2004).

$$V_z = V_{ef} / \varepsilon_V \quad (3.4)$$

A Norma ASHRAE 62.1 (ASHRAE, 2103) também utiliza o conceito de fatores relativos aos números de ocupante e à área do ambiente para o cálculo da vazão efetiva, conforme Equação (3.3). O cálculo da vazão de ar exterior na zona de ocupação é realizado através da eficiência de ventilação, conforme a equação (3.4), similarmente ao realizado pela Norma NBR 16.401-3 (ABNT, 2008). Os fatores recomendados por ASHRAE (2013) para ambientes de ensino, estão presentes na Tabela 3.18. Para salas de aulas pode-se visualizar que os fatores referentes às pessoas (R_p) e à área (R_a) são equivalentes aos propostos no nível 1 da NBR 16.401-3 (ABNT, 2008), apresentados na Tabela 3.17. As colunas da direita da Tabela 3.18 apresentam valores típicos de densidade de ocupantes para cada tipo de aplicação avaliada e um fator médio combinado de ventilação, calculado com base nessa densidade padrão.

Em relação às normas europeias, a EN 13779 (CEN, 2011) e atual EN 16798-5 (CEN, 2017) apresentam métodos de cálculo para vazão de ar externo em função da concentração de contaminantes e outras características de um dado ambiente. Em CEN (2006) são fornecidos valores de taxas de ar externo típicas conforme classificações do ar interior (IDA) propostas pela EN 13779 (CEN, 2011), reproduzidas na Tabela 3.19.

Tabela 3.18: Fatores recomendados para cálculo da vazão de ar externo para estabelecimentos de ensino pela Norma ASHRAE 62.1 (adaptado de ASHRAE, 2003).

Occupancy Category	People Outdoor Air Rate R_p		Area Outdoor Air Rate R_a		Notes	Default Values		Air Class	
						Occupant Density (see Note 4)	Combined Outdoor Air Rate (see Note 5)		
	cfm/person	L/s-person	cfm/ft ²	L/s-m ²		#/1000 ft ² or #/100 m ²	cfm/person		L/s-person
Educational Facilities									
Daycare (through age 4)	10	5	0.18	0.9		25	17	8.6	2
Daycare sickroom	10	5	0.18	0.9		25	17	8.6	3
Classrooms (ages 5–8)	10	5	0.12	0.6		25	15	7.4	1
Classrooms (age 9 plus)	10	5	0.12	0.6		35	13	6.7	1
Lecture classroom	7.5	3.8	0.06	0.3		65	8	4.3	1
Lecture hall (fixed seats)	7.5	3.8	0.06	0.3		150	8	4.0	1
Art classroom	10	5	0.18	0.9		20	19	9.5	2
Science laboratories	10	5	0.18	0.9		25	17	8.6	2
University/college laboratories	10	5	0.18	0.9		25	17	8.6	2
Wood/metal shop	10	5	0.18	0.9		20	19	9.5	2
Computer lab	10	5	0.12	0.6		25	15	7.4	1
Media center	10	5	0.12	0.6	A	25	15	7.4	1
Music/theater/dance	10	5	0.06	0.3		35	12	5.9	1
Multiuse assembly	7.5	3.8	0.06	0.3		100	8	4.1	1

Tabela 3.19: Taxas típicas de ar externo para classes da EN 13779 (CEN, 2011) de ar interior (CEN, 2006).

Category	Unit	Rate of outdoor air per person			
		Non-smoking area		Smoking area	
		Typical range	Default value	Typical range	Default value
IDA 1	$\text{l.s}^{-1}.\text{person}^{-1}$	> 15	20	> 30	40
IDA 2	$\text{l.s}^{-1}.\text{person}^{-1}$	10 – 15	12,5	20 - 30	25
IDA 3	$\text{l.s}^{-1}.\text{person}^{-1}$	6 – 10	8	12 -- 20	16
IDA 4	$\text{l.s}^{-1}.\text{person}^{-1}$	< 6	5	< 12	10

Um detalhamento do estudo referente às influências da QAI sobre o desempenho dos ocupantes de uma edificação, com foco em ambientes de ensino, encontra-se apresentado no Apêndice D, no qual são elencados e comparados os resultados obtidos em diferentes trabalhos de caráter experimental disponíveis na literatura sobre o tema, acerca dos efeitos provocados sobre saúde e desempenho dos estudantes em função das condições psicrométricas, vazão de ar e presença de contaminantes nas salas de aula.

Uma representação do procedimento teórico para realizar a modelagem da concentração de contaminantes em um ambiente interno e seu respectivo equacionamento obtido, encontra-se disponível, por sua vez, no Apêndice E. Nele é apresentado de um modelo desenvolvido para o ambiente de estudo do presente trabalho, da Sala A2, desenvolvido por Guilhotti (2021).

4. METODOLOGIA E APARATO EXPERIMENTAL

Na presente seção são apresentados os procedimentos para medição dos parâmetros adotados durante os ensaios experimentais realizados no presente trabalho, assim como o detalhamento das informações acerca dos ambientes de estudo utilizados como base para as medições e dos instrumentos empregados durante os experimentos.

4.1. Aprofundamento Teórico

Previamente à realização dos ensaios experimentais apresentados ao longo do presente trabalho, procurou-se realizar o aprofundamento teórico acerca dos principais parâmetros de qualidade do ar e parâmetros físicos e psicrométricos do ambiente de base estudado. Estes parâmetros serão monitorados durante os ensaios, em função do tipo de análise planejada para cada experimento e das condições das variáveis externas que podem ter influência sobre os resultados das medições.

Este estudo teórico, detalhado na Item 3.1, envolveu o levantamento e a análise das principais recomendações e normas nacionais e internacionais que definem limites admissíveis acerca das concentrações dos diversos contaminantes nos ambientes internos e externo e das classes de filtragem recomendadas para o ar de renovação em cada tipo de aplicação. Com este estudo realizado, procurou-se definir os valores para as variáveis nos ensaios experimentais de forma a facilitar a comparação dos resultados com os parâmetros limite recomendados pelas principais normativas aplicáveis.

Na fase de planejamento de cada ensaio experimental, foi efetuado também o estudo de ensaios anteriores realizados em eventos similares, disponíveis em Bordini (2015), Fakhoury (2016) e Dal Pogeto (2017). Priorizou-se trabalhar, sempre que possível, com procedimentos experimentais e condições similares para as variáveis, de forma a facilitar a comparação entre os dados de medições em diferentes edições dos eventos monitorados e criar uma base de dados de medições desenvolvidas em condições similares.

4.2. Eventos Monitorados

Os parâmetros de qualidade do ar foram monitorados durante diferentes edições de eventos da Oficina de Carrinhos de Rolimã e da Oficina de Brinquedos, organizados pelo Programa Poli Cidadã, em parceria com o Centro Acadêmico da Engenharia Mecânica e Mecatrônica (CAM), nos quais alunos de escolas públicas da região são introduzidos a atividades de engenharia, como a elaboração de projetos e a fabricação de protótipos.

A Oficina de Carrinhos de Rolimã é geralmente realizada em dois dias consecutivos, durante o sábado e o domingo, nos quais os alunos são transportados para a Escola Politécnica no início da manhã de cada dia, ocupando a Sala A2 do Departamento de Engenharia Mecânica. Ao longo do evento, os alunos realizam atividades de projeto, preparação e planejamento e atividades de fabricação e pintura do protótipo de carrinho, em que há uma grande geração de materiais particulados no ambiente, influenciando a qualidade do ar interior da sala.

A Oficina de Brinquedos, por sua vez, é realizada ao longo de um único dia, em geral no sábado, e apresenta características similares de ocupação, com os alunos posicionados em bancadas na Sala A2, onde realizam o planejamento e a fabricação do protótipo, envolvendo atividades de lixamento e furação, dentre outras. Em ambos os eventos, há um intervalo para almoço, durante o qual a sala fica desocupada até o retorno dos alunos.

Com o impacto provocado pela pandemia do Coronavírus (SARS-CoV-2, COVID-19), que eclodiu no início de 2020, novos eventos das Oficinas não puderam ser realizados nos anos subsequentes. Os edifícios da Escola Politécnica ficaram com baixa ocupação neste período, dado as disciplinas terem passado a serem ministradas de forma remota. Neste cenário, optou-se ao longo desta fase pela realização de experimentos direcionados ao estudo de aspectos da qualidade do ar interior em condições específicas, como, por exemplo, em evento de varrição pneumática ocorrendo na área do campus e experimento com troca de filtros de diferentes classes de filtragem e variação da vazão de ar externo, para avaliação do comportamento dos parâmetros da qualidade do ar interior com as alterações efetuadas nas variáveis do sistema.

Neste período, com a motivação trazida pela pandemia e a preocupação com o efeito de agentes patogênicos no ar interior de ambientes ocupados, foram introduzidas medições de parâmetros biológicos nos experimentos, com a contagem de fungos viáveis coletados no ar interior e no ar externo. Isso representou um passo importante no projeto, com a inclusão de mais um aspecto

de grande relevância a ser avaliado acerca da qualidade do ar do ambiente, em conjunto com os demais parâmetros que já vinham sendo monitorados nos demais ensaios.

Com a conclusão das instalações dos sistemas de condicionamento de ar e ventilação do LEQAI, os recursos disponíveis para novos ensaios e análises se ampliarão notavelmente. Possibilitará, por exemplo, o estudo de diferentes configurações de sistemas de filtragem e a aplicação de um sistema ciclo-economizador para avaliação de seu impacto sobre o consumo energético e a qualidade do ar do ambiente.

4.3. Ambientes de Estudo

Como forma de se manter uma similaridade de condições entre as medições realizadas nos diferentes eventos, procurou-se utilizar, sempre que possível, o mesmo ambiente de estudo para realização das medições. Este ambiente consistiu na Sala A2 do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, cujas principais características físicas e sistemas de climatização e renovação de ar são apresentadas na sequência. Futuramente, poderão também ser utilizados os laboratórios constituintes do projeto LEQAI, em fase de implantação, cujo detalhamento é apresentado no Apêndice F.

4.3.1. Sala de Aula A2

O ambiente monitorado durante os experimentos, referente à Sala de Aula A2 da Engenharia Mecânica da EPUSP, possui dimensões e características de envoltória conforme a Tabela 4.1:

Tabela 4.1: Características físicas da Sala A2.

Características - Sala de Aula A2	
Formato:	Retangular
Comprimento:	16,1 m
Largura:	12,1 m
Área de Piso:	194,8 m ²
Pé direito até o forro:	2,8 m
Volume da sala:	545,5 m ³
Paredes:	Alvenaria
Cobertura	Laje Concreto

Na Figura 4.1, está marcada em vermelho a localização geográfica da Sala A2, no interior da área do prédio da Engenharia Mecânica. Está também indicado em azul o local onde estarão localizadas as futuras instalações do LEQAI, cujo detalhamento encontra-se no Apêndice F.

Figura 4.1: Vista aérea da localização das salas (fonte: google imagens).



O condicionamento de ar da sala A2 é realizado através de um sistema de expansão direta, com equipamentos do tipo “Split”, compostos por duas unidades evaporadoras do tipo “Piso Teto”, instaladas na parede ao fundo da sala, ao lado da porta de entrada e em frente à lousa. As unidades evaporadoras possuem filtros descartáveis no retorno, classe A1, estando as suas condensadoras posicionadas sobre a laje.

A renovação de ar para o ambiente condicionado é realizada através de quatro caixas de ventilação, posicionadas junto às tomadas de ar da sala, sobre o forro na parede da esquerda, olhando-se em direção à lousa. Essas caixas de ventilação possuem dois níveis de filtragem, com um filtro grosso de classe G4 seguido de um filtro médio de classe M5. Seu acionamento pode ser realizado de forma individual e independente do sistema de climatização, o que oferece uma grande flexibilidade de condições para a variação da vazão de ar externo na sala durante os ensaios experimentais.

O insuflamento do ar de renovação no interior da sala é realizado através de quatro difusores de ar, posicionados próximos à parede da esquerda, um dedicado a cada caixa de ventilação. O posicionamento dos difusores na sala promove um fluxo de ar de renovação da esquerda para a direita, com a mistura com o ar de recirculação sendo realizado próximo ao centro da sala, conforme previsto no projeto do ambiente. Essa configuração de equipamentos motivou, dentre outras análises, o estudo da estratificação dos contaminantes no interior do ambiente, apresentada ao longo do presente trabalho.

Na Figura 4.2 e na Figura 4.3, encontram-se representados os posicionamentos dos elementos do sistema de ar condicionado e renovação de ar no interior da sala.

Figura 4.2: Vista de corte da Sala A2 (adaptado de Fakhoury, 2017).

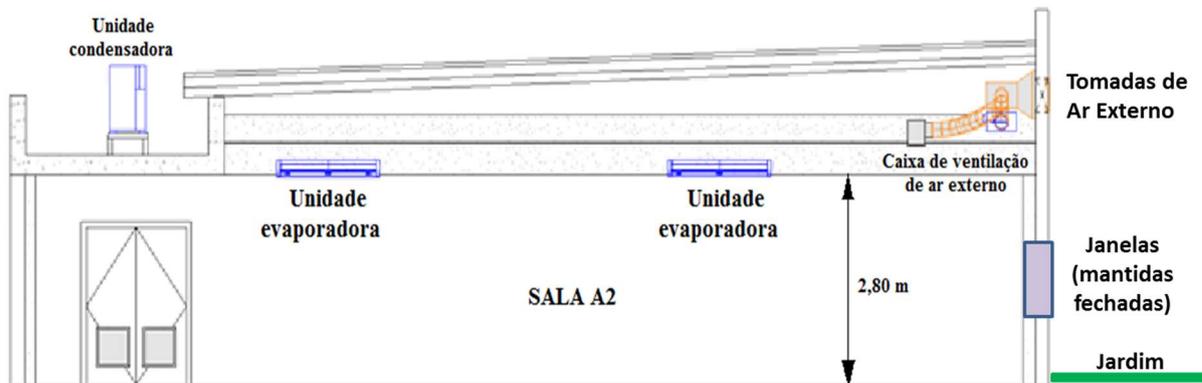
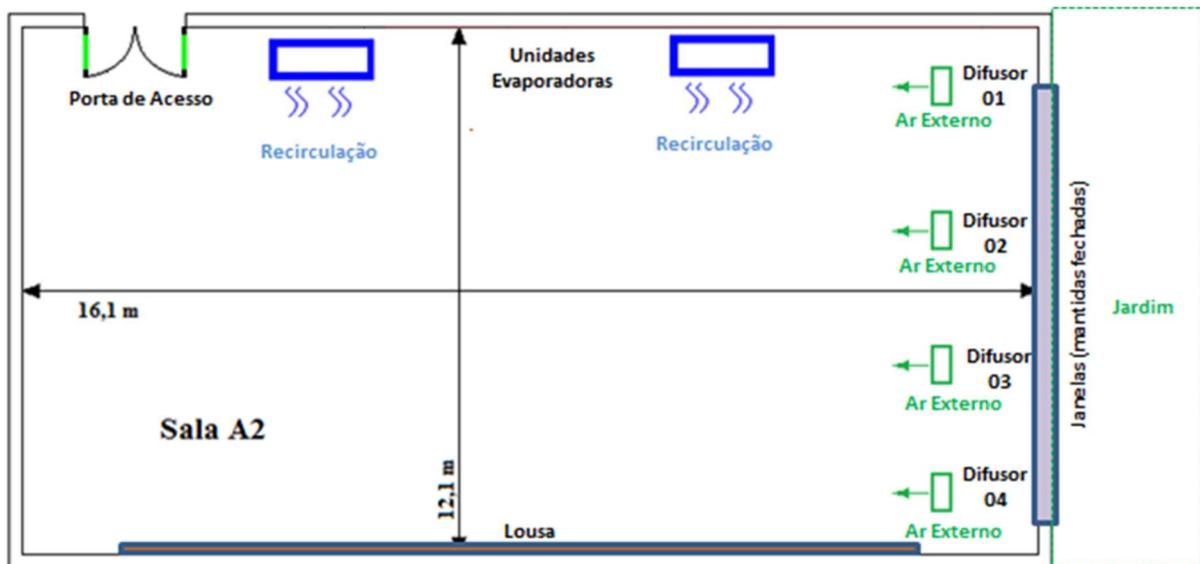


Figura 4.3: Planta da Sala A2 (adaptado de Fakhoury, 2017).



Na Figura 4.4 e na Figura 4.5, podem ser visualizadas fotos do interior da sala, onde pode ser verificado o posicionamento dos quatro difusores de insuflamento de ar externo no forro, ao fundo da Figura 4.4, assim como as duas unidades evaporadoras e a porta de acesso à sala, na Figura 4.5.

Figura 4.4: Foto da Sala A2 em atividade da equipe do LEQAI, com os difusores ao fundo.



Figura 4.5: Foto da Sala A2 em atividade da equipe do LEQAI, com unidades evaporadoras ao fundo.



Na Tabela 4.2 e na Tabela 4.3, são detalhados os modelos e as capacidades dos equipamentos empregados no sistema de ar condicionado e ventilação da sala, enquanto no Gráfico 4.1 pode ser visualizada a curva de operação das caixas de ventilação.

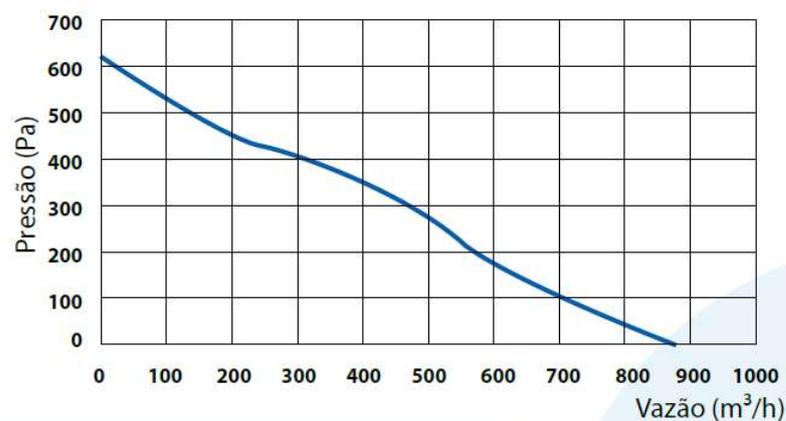
Tabela 4.2: Dados técnicos dos condicionadores de ar da Sala A2 (CARRIER, 2022).

Dados dos Condicionadores - Sala A2	
Modelo:	Split Piso-Teto
Fabricante:	Carrier
Modelo Evaporadora:	42XQM48C5
Modelo Condensadora:	38CQEP048535MC
Capacidade Refrigeração:	14 kW (48.000btu/h)
Vazão de Ar:	1.785 m ³ /h
Compressor:	Scroll
Fluido Refrigerante	R-410A
Consumo Elétrico a 100%:	4,8 kW
COP:	3,0

Tabela 4.3: Dados técnicos das caixas de renovação de ar da Sala A2 (MULTIVAC, 2017).

Dados das Caixas de Ventilação - Sala A2	
Modelo:	Radial Centrífugo
Fabricante:	Multivac
Modelo:	CFM 1000
Filragem:	G4+M5
Vazão Máxima (G4):	1.000 m ³ /h
Vazão Máxima (G4+M5):	900 m ³ /h
Pressão Máxima:	620 Pa
Potência Elétrica:	215 W
Nível de ruído:	51 dB(A)

Gráfico 4.1: Curva de operação das caixas de renovação de ar da Sala A2, com filtros G4+M5 (MULTIVAC, 2017).



4.4. Procedimentos Experimentais

Os procedimentos adotados para coleta das medições foram definidos conforme planejamento prévio realizado para cada experimento, em função do tipo de análise e dos objetivos traçados para cada caso. De forma geral, os procedimentos consistiram na medição de parâmetros psicrométricos e de contaminantes pré-determinados no ar interior e na área externa, junto às tomadas de ar. Ao longo dos experimentos, o sistema de climatização da sala permitiu a atuação sobre variáveis como a vazão de ar externo, alterada em degraus conforme o número de caixas de ventilação acionadas, as classes dos filtros e o nível de ocupação do ambiente, com seu impacto sobre a geração interna de contaminantes. Na sequência são detalhados os procedimentos de medição utilizados em cada experimento realizado.

4.4.1. Medições nos eventos de oficinas

Em um período de cinco anos, entre o início de 2015 e o final de 2019, experimentos foram realizados monitorando o ar interior de ambientes em eventos organizados em conjunto pelo Programa Poli Cidadã e Centro Acadêmico da Engenharia Mecânica e Mecatrônica (CAM). Nestes eventos, realizados com alunos de escolas públicas da região da USP, com idades entre 10 e 14 anos, são realizadas atividades de ensino relacionadas a duas principais subatividades: elaboração de projetos e fabricação de protótipos.

Os dados das medições efetuadas nos eventos realizados entre 2015 e 2018 estão disponíveis em Bordini (2015), Fakhoury (2016), Dal Pogeto (2017) e Guilhotti (2021). A partir do início de 2020, com as restrições de circulação e ocupação dos ambientes impostas pela pandemia do Coronavírus, os eventos não puderam ser realizados. As edições dos eventos listadas a seguir tiveram sua qualidade do ar monitorada como parte integrante do presente trabalho:

- VIII Oficina de Carrinhos de Rolimã –2018
- IV Oficina de Brinquedos – 2019
- IX Oficina de Carrinhos de Rolimã – 2019

As oficinas são realizadas na Sala de Aula A2, cujas características foram detalhadas no item 4.3.1. A Oficina de Brinquedos é realizada ao longo de um único dia e a Oficina de Carrinhos de Rolimã dura dois dias, ao longo de um final de semana. As medições dos parâmetros são realizadas no interior do ambiente e no ar externo. São também monitorados a vazão de ar de

renovação, o tipo de atividade realizada e o número de ocupantes no interior do ambiente, entre cada período de medição.

As medições das grandezas no interior da sala foram realizadas em intervalos de 10 minutos, com os sensores posicionados no centro do ambiente, dentro da área de ocupação, a uma altura de 1,5 m do piso. A medição dos parâmetros de referência no ar externo, por sua vez, deu-se a cada 20 minutos, visando-se o posicionamento dos sensores o mais próximo possível das tomadas de ar exterior da sala.

Na Figura 4.6 pode-se visualizar fotos do posicionamento da estação de medição no interior do ambiente durante eventos da Oficina de Brinquedos (esquerda) e da Oficina de Carrinhos de Rolimã (direita). Na Figura 4.7 é ilustrado o posicionamento dos sensores para as medições realizadas na área externa, próximo às tomadas de ar da sala.

Figura 4.6: Posicionamento dos instrumentos de medição no ar interior durante os eventos.



Figura 4.7: Posicionamento dos instrumentos de medição no ar externo durante os eventos.



Durante as oficinas, a vazão de ar externo fornecido à sala foi variada de acordo com o número de caixas de ventilação em operação. Houve momentos sem renovação de ar, em que todas as caixas estavam desligadas, até momentos em que foram acionadas as 4 caixas de ventilação, sendo fornecida vazão máxima ao ambiente. Os níveis de vazão utilizados foram definidos seguindo critérios em função do tipo de análise almejada para um dado período do dia. Um critério de seleção é a manutenção de níveis de renovação abaixo, próximos ou acima daqueles recomendados pelas normas em função do número de ocupantes da sala. Outro possível critério é realizar estudos de taxas de crescimento e decaimento de contaminantes, com um dado nível de renovação de ar e tipo de atividade realizada pelos ocupantes no interior da sala.

Ao longo dos eventos, os ocupantes presentes no interior do ambiente (alunos, professores e monitores) realizaram atividades de diferentes perfis, desde uma etapa inicial com explicações didáticas e os alunos sentados, até momentos de grande movimentação dos ocupantes, conforme detalhado nas tabelas de medição apresentadas no Anexo C e no Anexo D. As etapas de montagem e fabricação dos protótipos compreenderam atividades de lixamento, furação e pintura, cada qual com diferentes taxas de geração de poluentes.

Os parâmetros psicrométricos e de qualidade do ar monitorados durante os eventos foram:

- Temperatura de bulbo seco (TBS)
- Umidade relativa (UR)
- Concentração de CO₂
- Concentração de particulados PM₁
- Concentração de particulados PM_{2,5}
- Concentração de particulados PM₁₀

O detalhamento da instrumentação empregada durante os ensaios é apresentado no item 4.5, compreendendo, além de equipamentos portáteis, também um medidor para o monitoramento contínuo dos parâmetros. Esse medidor foi instalado em pontos localizados no centro da sala, na parede lateral e na área externa. Com as medições realizadas nos equipamentos manuais foram preenchidas planilhas de coleta de dados durante os experimentos, conforme o exemplo presente na Tabela 4.4 e os dados apresentados no Anexo C e no Anexo D, comparados posteriormente com os obtidos pelo equipamento de monitoramento contínuo.

Figura 4.8: Indicação dos pontos de medição e das estações de trabalho na Sala A2.

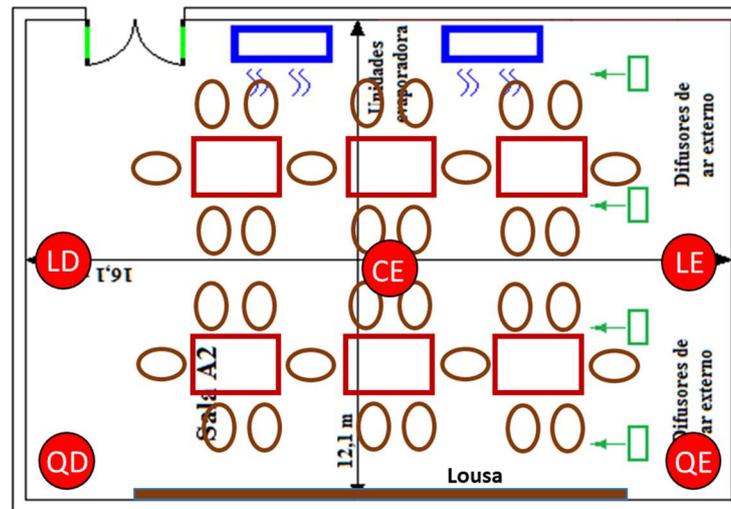
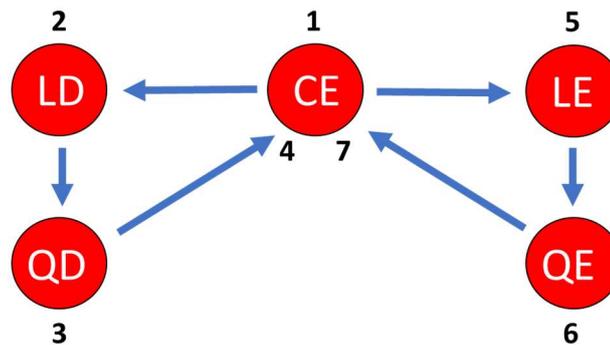


Figura 4.9: Diagrama da sequência de pontos de medição para análise de estratificação.



4.4.1.2. Medições de decaimento de contaminantes

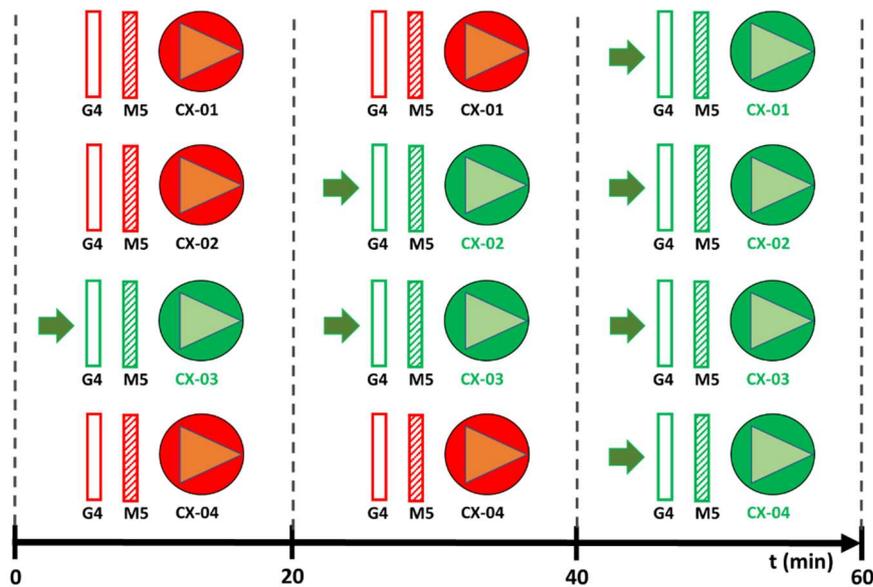
Ao longo do intervalo de almoço dos dias de realização da Oficina de Carrinhos de Rolimã de 2019, realizou-se um novo tipo de análise sobre a taxa de decaimento das concentrações de contaminantes no interior do ambiente, em função da taxa de renovação de ar empregada. Para tal, procurou-se reduzir a vazão de renovação de ar na sala no período da manhã dos dias do evento, nos períodos que antecederam à saída dos alunos e monitores para o almoço, de forma que fossem obtidos níveis elevados de concentração de poluentes (CO_2 e particulados) no início do intervalo.

Com os altos níveis de concentração obtidos e a saída dos ocupantes do ambiente, cessando assim a geração interna de contaminantes, realizou-se, no período do almoço, um experimento para analisar a taxa de decaimento dos níveis de poluentes no interior do ambiente em função do tempo, para diferentes faixas de vazão de renovação de ar adotadas. Os valores dos ensaios

foram utilizados, dentre outros fins, para validação e calibração do modelo teórico de cálculo dos contaminantes no interior da sala proposto por Guilhotti (2021), com base nas equações diferenciais que regem o comportamento dos poluentes, apresentadas no Apêndice E.

Ao longo do período do almoço, com duração de 1 hora em cada dia, foram monitorados os níveis de concentração de CO₂ e de particulados (PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁) no interior do ambiente. Para a medição dos materiais particulados utilizou-se um contador de partículas, cujo modelo encontra-se detalhado no item 4.5.3. O equipamento foi configurado para um período de amostragem de 30 segundos para cada medição, com um intervalo de espera entre as coletas de outros 30 segundos. Esse intervalo é importante para permitir o reestabelecimento das condições iniciais do equipamento, para que uma medição não influencie na sua sucessiva e sejam obtidos valores consistentes nos ensaios.

Figura 4.10: Sequência de acionamento das caixas de renovação durante intervalo de almoço.



Durante o período de medições variou-se a vazão de ar externo fornecido ao ambiente, em três estágios, com duração de 20 minutos cada. Ao longo dos estágios as caixas de renovação foram acionadas de forma sucessiva, iniciando-se por uma única caixa, seguida por duas caixas e finalmente com as quatro caixas operantes, representando a vazão de renovação máxima de projeto da sala. O esquema da sequência de acionamento das caixas de ventilação é apresentado na Figura 4.10.

4.4.2. Medições no evento com varredor pneumático

Em medições de qualidade do ar interior realizadas durante a Oficina de Brinquedos de 2018, verificou-se um aumento muito significativo da concentração de particulados finos ($PM_{2,5}$) no ambiente externo. Nestes momentos ocorria um processo de varrição pneumática próximo à Sala A2, com equipamento soprador de folhas e resíduos vegetais. Os dados obtidos para o $PM_{2,5}$ naquele evento podem ser visualizados no Gráfico 5.33, sendo discutidos em detalhes em Dal Pogeto et al. (2018).

Esse comportamento fora do padrão verificado para os poluentes serviu como motivação para a execução de um novo experimento, direcionado para avaliar os possíveis impactos da utilização de varrição pneumática nos entornos da sala sobre a qualidade do ar interior do ambiente. O novo experimento foi realizado no dia 17/10/2020, um sábado, quando estava programada pela empresa responsável pela manutenção a execução de serviços de limpeza e jardinagem na área externa do prédio da Engenharia Mecânica da EPUSP, com utilização de um soprador de folhas.

As medições foram realizadas pela equipe do LEQAI com o apoio de equipe da Conforlab Engenharia Ambiental e o suporte da Omni Eletrônica. Os principais parâmetros avaliados durante o novo experimento foram a concentração de materiais particulados, com foco para as partículas finas ($PM_{2,5}$, PM_1 e $PM_{0,5}$). Foi realizada também a análise de agentes biológicos, através da concentração de fungos viáveis presentes no ar, levantada através do procedimento detalhado no item 4.4.2.1.

Para a verificação da influência das condições ambientais locais sobre os resultados obtidos, foram monitoradas ao longo do experimento as condições psicrométricas e meteorológicas do ambiente externo. Dado o soprador de folhas ser considerado como uma fonte pontual de contaminantes, foi também realizado o monitoramento da distância do operador do soprador em relação à tomada de ar externo da Sala A2. De forma geral, os seguintes parâmetros foram monitorados ao longo do experimento:

- Temperatura de bulbo seco (TBS)
- Umidade relativa (UR)
- Velocidade do vento
- Direção do vento
- Concentração de CO_2

- Concentração de particulados PM_{10}
- Concentração de particulados $PM_{2,5}$
- Concentração de particulados PM_1
- Concentração de particulados $PM_{0,5}$
- Concentração de compostos orgânicos voláteis (COVs)
- Concentração de fungos viáveis totais (após análise em laboratório)
- Concentração dos gêneros fúngicos identificados (após análise em laboratório)
- Distância do operador do soprador em relação à sala.

Na Figura 4.11 pode-se visualizar uma representação do trajeto percorrido pelo operador do soprador ao longo do experimento e sua posição em relação à sala A2. São indicados também os pontos de medição definidos para os parâmetros monitorados.

Figura 4.11: Trajeto do soprador e pontos de medição (VALENCIO E HERSCHANDER, 2021).



As medições foram realizadas no ambiente interno e no meio exterior, através de instrumentos portáteis, detalhados ao longo do item 4.5, e por sistema de monitoramento contínuo, cujas especificações são apresentadas no item 4.5.4. Foram estabelecidos intervalos de tempo de 15 minutos para a leitura dos instrumentos manuais, enquanto o sistema de monitoramento contínuo foi programado para realizar registros a cada intervalo de 1 minuto.

Quanto à renovação de ar na sala, foram mantidas em operação durante o experimento duas das quatro caixas de ventilação de ar externo, dotadas de filtros classe G4+M5. Durante a parte final do experimento foram ainda substituídos os filtros das caixas de ventilação para a comparação entre o desempenho dos filtros usados e novos.

Na Tabela 4.5 são apresentados os principais dados técnicos do modelo de soprador de folhas empregado no experimento. Na Figura 4.12 podem ser visualizadas imagens do processo de varrição pneumática, com o posicionamento da coleta de material biológico e realização de medições de particulados e demais parâmetros junto às tomadas de ar externo da sala.

Figura 4.12: Processo de varrição com pontos de medição (adaptado de Dante e Bisordi (2020)).



Tabela 4.5: Dados técnicos do soprador de folhas utilizado no experimento (STIHL, 2022).

Dados do Soprador de Folhas	
Modelo:	A gasolina
Fabricante:	Stihl
Modelo:	BR-800
Vazão de Ar:	1.700 m ³ /h
Pressão de Sopro:	41 N
Velocidade do Ar:	81 m/s
Potência Elétrica:	3,2 kW

4.4.2.1. Análise biológica de fungos viáveis

Durante o experimento de estudo do impacto do processo de varrição pneumática sobre a qualidade do ar interior da Sala A2, foram introduzidas nos ensaios realizados pela equipe do LEQAI análises referentes à concentração de agentes biológicos no ambiente, representados pelos fungos viáveis. Este tipo de análise possui grande relevância, objetivando garantir um ambiente saudável para os ocupantes. Após os ensaios, efetuados com o apoio de equipe da Conforlab Engenharia Ambiental, são identificados os tipos de gêneros fúngicos presentes nas coletas de amostras de ar e calculados seus níveis de concentração, de forma a validar se os valores obtidos se encontram no interior dos limites recomendados por ANVISA (2003), de 750 UFC/m³, e se existe a presença de elementos patogênicos.

O procedimento de coleta material biológico durante os ensaios experimentais foi realizado através do emprego de um amostrador de Andersen, cujo princípio de funcionamento encontra-se detalhado no item 4.5.6. Com a utilização deste amostrador, o material a ser analisado foi coletado em placas de Petri, confeccionadas com um meio de cultura de fungos em ágar dextrose.

As coletas de materiais biológicos foram realizadas em dois pontos de medição no interior do ambiente, com altura de 1,5m do piso. Um deles foi posicionado próximo ao centro da sala e o outro próximo à parede esquerda, próximo à área dos difusores de insuflamento de ar de renovação, conforme pode ser visualizado na Figura 4.13. Um terceiro ponto de coleta foi instalado na área externa, próximo às tomadas de ar da sala, conforme Figura 4.14.

Figura 4.13: Indicação dos pontos de coleta para análise de fungos viáveis no interior da Sala A2.

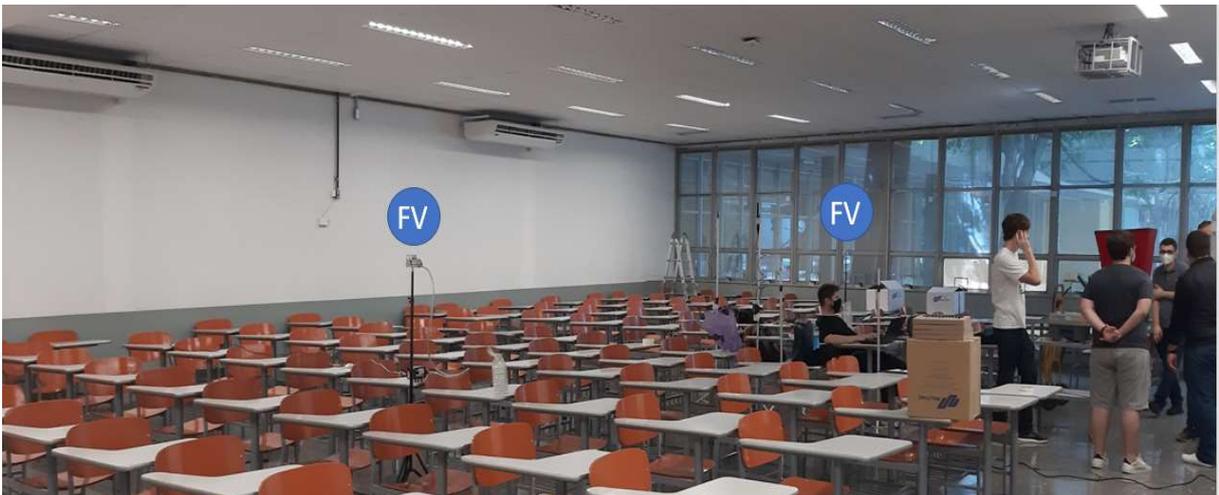


Figura 4.14: Indicação do ponto de coleta para análise de fungos viáveis na área externa.



Após a coleta das amostras, as placas de Petri foram numeradas e nomeadas de acordo com o ponto de medição e o período do experimento a que se referiam. Posteriormente, as amostras coletadas foram enviadas para o laboratório da Conforlab, onde foram mantidas no interior de uma incubadora, por uma semana, em condições de temperatura e umidade controladas, para permitir o crescimento dos fungos. Na Figura 4.15 pode-se visualizar o aspecto das amostras antes (esquerda) e após (direita) o período de incubação.

Figura 4.15: Aspectos das amostras de material biológico antes e após o período de incubação.



Após o período de crescimento na incubadora, realizou-se, com o auxílio dos profissionais do laboratório da Conforlab, a identificação dos gêneros fúngicos presentes nas amostras, através de análise morfológica, e a contagem de Unidades Formadoras de Colônias (UFCs). A Figura 4.16 apresenta um exemplo do processo de leitura das amostras realizado no laboratório.

Figura 4.16: Processo de análise das amostras de material biológico (ARGENTON E PRADO, 2021).



4.4.3. Medições com troca de filtros de diferentes classes de filtragem

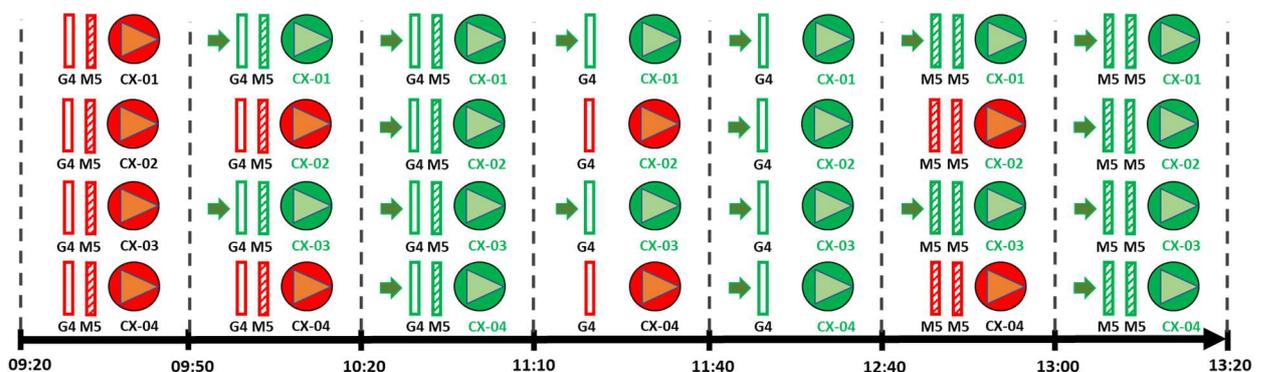
Para a avaliação dos efeitos da variação das classes de filtragem dos filtros de ar utilizados nas caixas de renovação sobre a qualidade do ar interior do ambiente, foi desenvolvido um experimento, realizado em 20/11/2021. As medições foram realizadas em conjunto pelas equipes do LEQAI e da Conforlab Engenharia Ambiental, com o apoio da Omni Eletrônica, através da instalação e configuração do sistema de monitoramento contínuo de contaminantes, conforme detalhado no item 4.5.4.

Durante o experimento desenvolvido, foram realizadas de forma sucessiva as trocas dos filtros das caixas de renovação da Sala A2. No total foram avaliadas três opções de conjuntos de elementos de filtragem, sendo:

- Filtro Grosso G4 + Filtro Médio M5 (configuração de projeto)
- Somente Filtro Grosso G4
- Filtro Médio M5 + Filtro Médio M5

Para cada combinação de filtros estudada variou-se a vazão de renovação da sala, através da alteração do número de caixas de ventilação de ar externo ativadas. Foram adotados dois estágios para cada caso, o primeiro com duas caixas ligadas, representando metade da vazão de projeto da sala, e o segundo com todas as caixas em operação. Entre cada alteração de variável realizada aguardou-se um período de estabilização dos dados no interior do ambiente, da ordem de 20 a 30 minutos, para realizar as medições dos parâmetros e a montagem da nova configuração. A Figura 4.17 apresenta uma linha do tempo com as combinações de filtros e equipamentos em operação ao longo do experimento.

Figura 4.17: Sequência de operação e filtragem das caixas de renovação durante os ensaios.



Conforme se pode visualizar na Figura 4.17, na primeira etapa, no horário entre as 09:20 e as 09:50, foram realizadas medições dos parâmetros no interior do ambiente, preliminarmente ao acionamento da renovação de ar. Estes valores foram utilizados como dados de referência (“*base-line*”) do ensaio. Ao longo do experimento foram também realizadas medições no ambiente externo, próximo às tomadas de ar, em intervalos de 30 minutos, de forma que fossem monitoradas eventuais alterações das condições ambientais externas ao longo da manhã do experimento.

Durante os ensaios foram medidos dados psicrométricos e de concentração de contaminantes, incluindo-se o levantamento de agentes biológicos nos ambientes interno e externo, realizado com apoio da equipe da Conforlab. Em resumo, foram monitorados os seguintes parâmetros:

- Temperatura de bulbo seco (TBS)
- Umidade relativa (UR)
- Concentração de CO₂
- Concentração de particulados PM_{0,5}
- Concentração de particulados PM₁
- Concentração de particulados PM_{2,5}
- Concentração de particulados PM₁₀
- Concentração de compostos orgânicos voláteis (COVs)
- Concentração de fungos viáveis totais (após análise em laboratório)
- Concentração dos gêneros fúngicos identificados (após análise em laboratório)
- Vazão de ar nos difusores de insuflamento

Para o estudo dos compostos orgânicos voláteis realizou-se durante o experimento a aplicação de produtos de limpeza em áreas pré-definidas da sala, em intervalos de aproximadamente uma hora entre as aplicações. Para a coleta das amostras de agentes biológicos realizou-se o procedimento conforme detalhado no item 4.4.2.1, tendo sido realizadas coletas no ambiente interno e na área externa, em intervalos correspondentes às mudanças apresentadas na Figura 4.17 de configuração do sistema de renovação de ar da sala. A Figura 4.18 contém uma imagem do posicionamento das estações de medição e coleta de amostras de material biológico no interior do ambiente, representados pelos fungos viáveis (FV).

Figura 4.18: Posicionamento dos pontos de medição no interior do ambiente.



Em função da fase de preparação dos edifícios da Escola Politécnica para receber a volta dos alunos nas aulas presenciais, foi realizado um teste referente a uma alternativa de adequação no sistema de renovação de ar da Sala A2, por meio da instalação de ventiladores auxiliares, instalados nas redes de dutos de ar externo, em série com as caixas de renovação de ar existentes. Esta adaptação da instalação da sala foi realizada no dia anterior ao evento. A nova configuração com ventiladores em série foi empregada em metade das caixas de ventilação do ambiente, caixas 2 e 4, para que os valores de vazão medidos nesses conjuntos pudessem ser comparados com os obtidos para as duas demais caixas, de números 1 e 3, que permaneceram com a configuração inicial de projeto.

O objetivo desta análise foi de verificar se a instalação do ventilador auxiliar provocaria um incremento de vazão de ar externo no sistema, que justificasse a sua instalação. Na Figura 4.19, pode-se visualizar um esquema simplificado do sistema de renovação de ar planejado com a inclusão dos ventiladores em série. Na Tabela 4.6 e no Gráfico 4.2 são disponibilizadas as informações técnicas e a curva de operação dos novos ventiladores auxiliares instalados.

Figura 4.19: Esquema do sistema de renovação de ar com a inclusão dos ventiladores auxiliares (ARGENTON E PRADO, 2021).

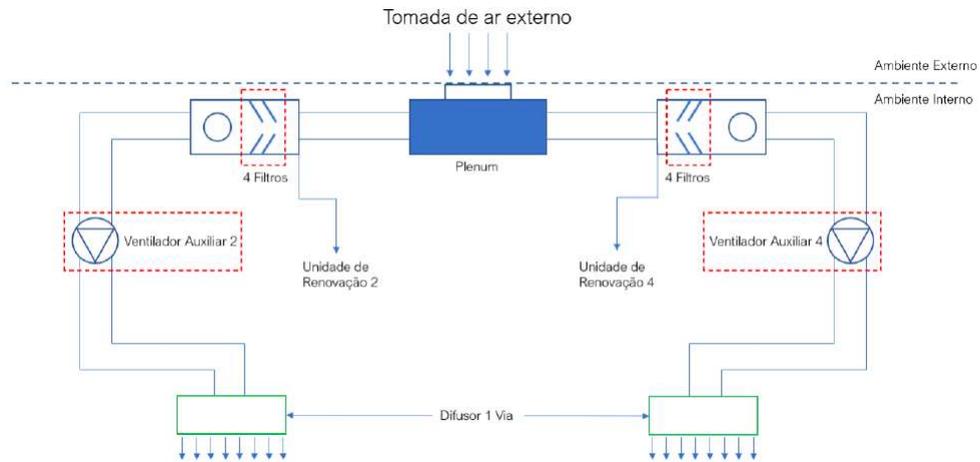
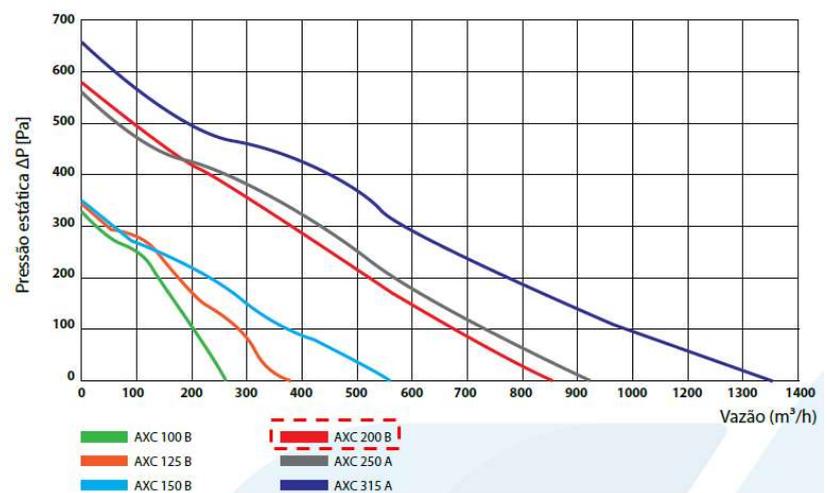


Tabela 4.6: Dados técnicos dos ventiladores auxiliares (MULTIVAC, 2017).

Dados dos Ventiladores Auxiliares - Sala A2	
Modelo:	Centrífugo em linha
Fabricante:	Multivac
Modelo:	AXC-200B
Vazão Máxima:	865 m ³ /h
Pressão Máxima:	572 Pa
Potência Elétrica:	160 W
Nível de Ruído:	60 dB(A)

Gráfico 4.2: Foto e curva de operação dos ventiladores auxiliares (adaptado de MULTIVAC, 2017).



4.5. Instrumentação

Neste item será fornecido o detalhamento dos instrumentos empregados ao longo dos ensaios experimentais descritos no item 4.4, para o monitoramento dos parâmetros da qualidade do ar interior estudados.

4.5.1. Temperatura e umidade relativa

Para o monitoramento dos parâmetros psicrométricos no interior do ambiente e no ar exterior durante os experimentos utilizou-se um termo-higrômetro, cujas principais características são detalhadas na Tabela 4.7. As grandezas medidas pelo equipamento são a Temperatura de Bulbo Seco (TBS), através de um sensor termoresistivo, e a Umidade Relativa (UR), por um sensor de umidade capacitivo presente no instrumento. Na Figura 4.20, pode-se visualizar como foi realizada a montagem da estação de medição, onde foram alocados o termo-higrômetro (abaixo) e o sensor de CO₂ (acima).

Tabela 4.7: Dados técnicos do termo-higrômetro utilizado nos ensaios (HOMIS, 2022)

Dados Técnicos do Termo-higrômetro		
Fabricante:	Homis	
Modelo:	HTH-154	
Grandeza medida:	Temperatura Bulbo Seco	Umidade Relativa
Tipo de sensor:	Termistor	Capacitivo
Faixa de Medição:	0 a 50°C	10 a 95%
Exatidão:	± 0,8°C	± 3%
Resolução:	0,1°C	0,1%

Figura 4.20: Exemplo de montagem da estação de medição utilizada nos experimentos.



O sensor de umidade relativa (higrômetro) utilizado é constituído de um material hidrófilo, conforme conceito detalhado em Bolliger e Mariani (2016), que tende a entrar em equilíbrio de umidade com o ambiente para uma dada temperatura, provocando uma variação em sua capacitância, mensurada pelo sistema eletrônico do instrumento.

Os valores monitorados das grandezas de temperatura de bulbo seco e umidade relativa foram utilizados, na fase de análise de resultados dos ensaios, para verificar se as condições no interior do ambiente se mantiveram dentro das faixas de conforto recomendadas em ABNT (2008) durante os experimentos, conforme detalhadas no item 3.3.1. Analisa-se dessa forma se o sistema de condicionamento de ar está apto para atender às demandas de carga térmica dos eventos.

Em posse dos valores medidos de TBS e UR, utilizando-se as equações da psicrometria, é possível também calcular os valores para outras grandezas derivadas, como umidade absoluta e entalpia. Essas grandezas serão usadas pelo sistema de automação do LEQAI para realizar o controle da vazão de ar de renovação, em função das condições de ar externo, quando for implementado o sistema ciclo-economizador.

4.5.2. Dióxido de carbono (CO₂)

O monitoramento da concentração de dióxido de carbono (CO₂) no interior do ambiente foi realizado através do emprego do medidor da Figura 4.21, cujas características estão detalhadas na Tabela 4.8. Ele funciona através do princípio de absorção com radiação infravermelha, do tipo NDIR (*“Non-Dispersive Infrared”*), com medição eletro-óptica da concentração do gás através da extensão da absorção de um comprimento de onda específico. Este processo utiliza como base a propriedade de cada gás de absorver radiação em um diferente comprimento de onda e envolve as seguintes etapas, conforme adaptado de Testo (2022):

- Uma fonte interna aos canais do equipamento emite radiação infravermelho;
- O CO₂ absorve radiação no comprimento de onda de $\lambda=4.27 \mu\text{m}$;
- A quantidade de radiação absorvida será proporcional à concentração de CO₂;
- Um sistema de filtros de banda permite passagem apenas da radiação com $\lambda=4.27 \mu\text{m}$;
- Com a diferença da intensidade da radiação coletada no detector em relação à emitida pela fonte, o instrumento calcula a concentração de CO₂.

Um esquema simplificado deste processo pode ser visualizado na Figura 4.22. Conforme detalhado em Mendes et al. (2015), a intensidade da radiação que é recebida pelo detector, em função da concentração de CO₂ na amostra de gases analisada, é dada pela lei de Lambert-Beer. Essa lei indica a existência de uma relação exponencial entre a absorção de luz de uma dada substância e a sua concentração, conforme Equação(4.1)

$$I = I_0 * e^{-k_\lambda * l * C} \quad (4.1)$$

Onde I é a intensidade da radiação recebida pelo detector, após a absorção pelo gás, I_0 é a intensidade da radiação emitida pela fonte, k_λ é o coeficiente de absorção do gás, para um dado comprimento de onda (no caso do CO₂ para $\lambda=4.27 \mu\text{m}$), l é o comprimento percorrido entre o emissor e o detector e C representa a concentração medida do gás.

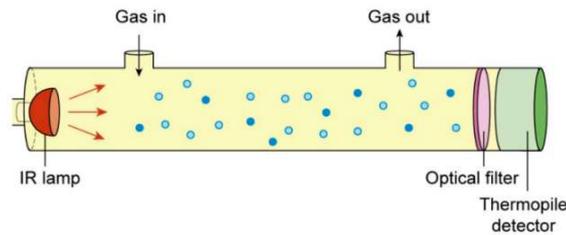
Tabela 4.8: Dados técnicos do medidor de CO₂ utilizado nos ensaios (TESTO, 2022).

Dados Técnicos do Medidor de CO₂	
Fabricante:	Testo
Modelo:	535
Princípio:	NDIR
Número de Canais:	2
Faixa de Medição:	0 a 9.999 ppm
Exatidão (a 23°C) para faixa de 0 a 5.000 ppm:	± (75 ppm + 3% do valor medido)
Exatidão (a 23°C) para 5.000 a 9.999 ppm:	± (150 ppm + 5% do valor medido)
Coefficiente para variação de temperatura de 23°C:	± (1 ppm + 0,4% do valor medido) / °C
Resolução:	1 ppm
Temperatura Ambiente:	0 a 50°C
Umidade Relativa:	0 a 99%

Figura 4.21: Imagem ilustrativa do medidor de CO₂ utilizado nos ensaios (TESTO, 2022).



Figura 4.22: Esquema simplificado do funcionamento do medidor de CO₂ utilizando o princípio NDIR (MENDES et al. (2015)).



Além do equipamento detalhado acima, utilizou-se também durante os ensaios experimentais um sistema de monitoramento contínuo de parâmetros da qualidade do ar interior, incluindo a concentração de CO₂, cujas informações são apresentadas no item 4.5.4.

4.5.3. Materiais particulados (PMs)

Os níveis de materiais particulados presentes no ambiente interno e na área externa foram monitorados ao longo do experimento com a utilização de um contador de partículas, cujos principais dados técnicos encontram-se detalhados na Tabela 4.9. Este equipamento utiliza um princípio óptico, referente ao espalhamento provocado na luz emitida por um diodo laser ao atingir as partículas presentes no ar, através do seguinte processo, conforme adaptado de Lighthouse (2022):

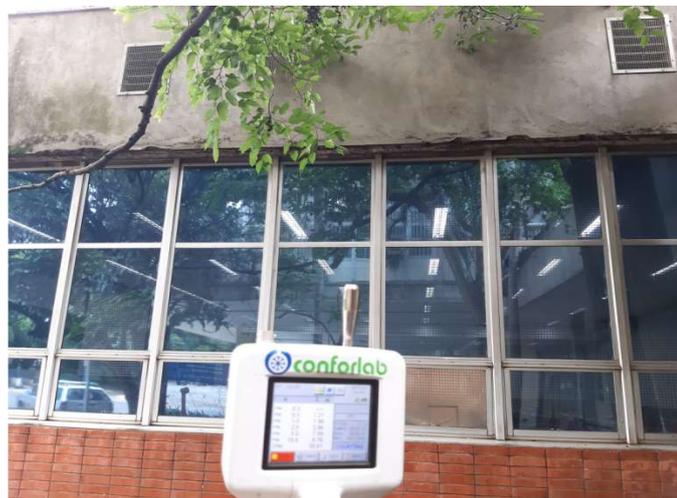
- Uma fonte interna aos canais do equipamento emite luz através de um diodo laser;
- Na medida em que passam pelos canais do equipamento as partículas provocam o espalhamento da luz emitida pelo diodo laser;
- Receptores óticos coletam e focam a luz em um fotodiodo que converte as rajadas de luz em pulsos elétricos;
- A altura dos pulsos emitidos é proporcional ao tamanho das partículas detectadas;
- Os pulsos são contados e sua amplitude é medida para dimensionamento de partículas;
- Os resultados são exibidos como contagens de partículas em cada canal com tamanho especificado, ou de forma cumulativa, de acordo com a configuração utilizada.

Na Figura 4.23, pode-se verificar um exemplo de utilização do contador de partículas durante os ensaios experimentais, para o monitoramento dos níveis de concentração de particulados na área externa. Ele foi posicionado próximo às tomadas de ar da Sala A2, que podem ser visualizadas no alto da imagem, sendo uma tomada de ar para cada conjunto de duas caixas de renovação, conforme ilustrado no esquema da Figura 4.19.

Tabela 4.9: Dados técnicos do contador de partículas utilizado nos experimentos (GRAYWOLF, 2018).

Dados Técnicos do Contador de Partículas	
Fabricante:	Lighthouse
Modelo:	GraywolfPC-016A
Princípio:	Diodo Laser
Número de Canais:	6
Faixa de Medição:	0,3 a 25 μm
Tamanhos dos canais:	0,3 – 0,5 μm 0,5 – 1,0 μm 1,0 – 2,5 μm 2,5 – 10 μm 10 – 25 μm
Vazão de ar coletado:	0,1 cfm (0,17 m ³ /h)
Exatidão da vazão de ar:	$\pm 5\%$
Eficiência de contagem:	50% p/ 0,3 μm 100% p/ > 0,45 μm
Exatidão da contagem:	$\pm 20\%$ p/ 0,3 μm $\pm 10\%$ p/ > 0,45 μm
Limite de contagem:	4x10 ⁶ partículas/ft ³
Resolução:	0,01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Temperatura Ambiente:	10 a 40°C
Umidade Relativa:	10 a 95%

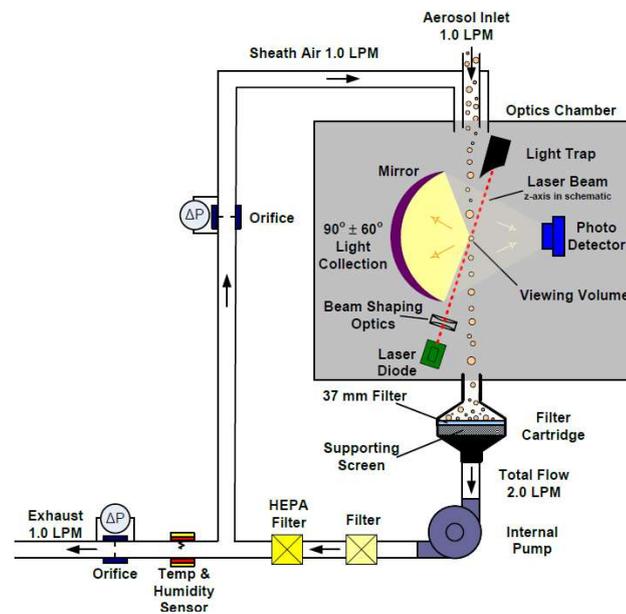
Figura 4.23: Medição de particulados na área externa com o contador de partículas.



O instrumento realiza a coleta do ar através de um bocal isocinético, para obter um fluxo laminar, sendo dotado de uma bomba de vácuo interna. Esta bomba promove a captação do fluxo de ar que passa pelos canais de medição do equipamento. Após sair dos canais, o ar é liberado de volta ao ambiente, sendo previamente tratado através de um filtro de ar absoluto (LIGHTHOUSE, 2022).

Uma representação do processo de um equipamento similar pode ser visualizada na Figura 4.24. Este equipamento de referência do esquema apresentado, de fabricação TSI, modelo OPS 3300, possui algumas propriedades adicionais além daquelas existentes no instrumento utilizado nos experimentos, como uma linha de by-pass de ar, que tem o objetivo de ajustar a vazão em função de variações da pressão ambiente. O princípio de funcionamento geral, porém, é similar ao do equipamento utilizado nos ensaios.

Figura 4.24: Esquema interno de um contador de partículas (TSI, 2022).



O tempo de coleta de ar para as amostras, assim como o número de ciclos e o tempo de espera entre as medições, pode ser ajustado nas configurações do equipamento. Na Figura 4.25, pode-se visualizar um exemplo com a configuração programada para as medições do ensaio com troca de filtros de diferentes classes de filtragem, detalhado no item 4.4.3.

Figura 4.25: Ajuste das configurações de coleta de amostras no contador de partículas.



Realizada a contagem das partículas e de seus tamanhos em cada canal, o “software” interno do instrumento promove o cálculo dos valores específicos, ao dividir o número de partículas pelo volume de ar coletado na amostra. Esse cálculo se dá em função da vazão padrão da bomba de vácuo do equipamento e do tempo de amostra programado, conforme Equação (4.2), onde n_{part} representa o valor específico por volume, Q_b é a vazão e t_a o tempo de coleta da amostra.

$$n_{part} = \frac{N_{part}}{Q_b * t_a} \quad (4.2)$$

Neste cálculo temos envolvidas as incertezas referentes à exatidão do equipamento, relativas à vazão do ar promovido pela bomba de vácuo e à contagem das partículas, apresentadas na Tabela 4.9. O detalhamento do cálculo das incertezas envolvidas nas medições é apresentado no Apêndice H.

Com o número específico de partículas por volume de ar calculado para cada um dos canais, o software do equipamento realiza então algumas considerações e aproximações para chegar aos valores de concentração mássica, em $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Essa conversão é realizada para que possa ser efetuada a comparação com os valores limite de concentração recomendados pelas normas, detalhados no item 3.4.1. Um estudo acerca das incertezas envolvidas em medições de partículas e densidades pode ser verificado em Saranji et al. (2016). Não foi obtido acesso ao algoritmo de cálculo utilizado pelo modelo de instrumento específico empregado durante os experimentos, porém algumas considerações adotadas em contadores de partículas deste tipo são descritas abaixo:

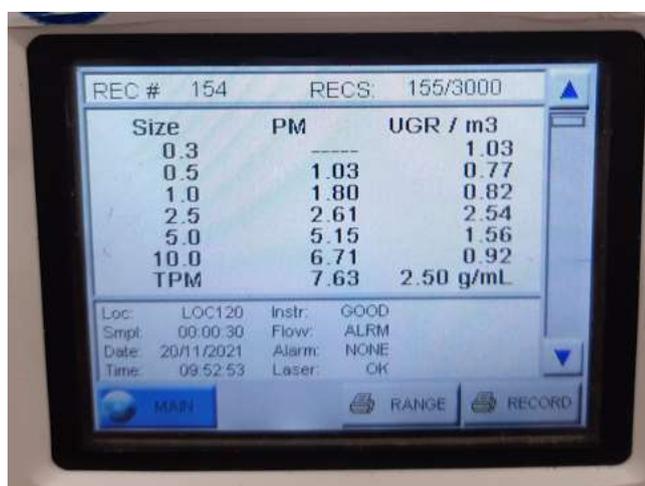
- Formato das partículas considerado como esféricas;
- Superfícies das partículas consideradas como não porosas;
- Propriedades químicas e elétricas das partículas consideradas como constantes;
- Índice de refração das partículas adotado como constante;
- Densidade das partículas consideradas constantes e iguais a uma densidade padrão pré-definida para o ar ambiente.

O cálculo da concentração mássica, com base nas simplificações detalhadas acima, pode ser realizado através da Equação (4.3), onde n_{part} é a contagem específica de partículas, dada na Equação (4.2), ρ_{part} é a densidade específica da partícula, adotada como constante, e d_{part} é o diâmetro da partícula.

$$c_{PM} = \frac{\pi}{6} * n_{part} * \rho_{part} * d_{part}^3 \quad (4.3)$$

Para o caso do equipamento utilizado nas medições, com a configuração adotada nos ensaios, os dados são apresentados na tela do instrumento conforme o exemplo da Figura 4.26. Os dados da coluna da esquerda se referem aos valores de concentração mássica cumulativos para os diâmetros de particulados (PM₁₀, PM_{2,5}, PM₁ e PM_{0,5}), enquanto os dados da coluna da direita representam os valores de concentração obtidos em cada canal. Para as análises, foram utilizados os dados cumulativos.

Figura 4.26: Exemplo de leitura dos dados na tela gráfica contador de partículas.



A massa específica padrão empregada no instrumento como “default” foi de 2,5 g/ml, como pode ser visto no canto inferior direito da Figura 4.26. Conforme as referências apresentadas no Apêndice C, este valor está acima do usualmente obtido para o ar ambiente nas cidades. Esses valores podem variar de acordo com as condições climáticas e específicas do local. Zhao et al. (2017) por exemplo obtiveram valores entre 1,3 e 1,6 g/ml, em função da época do ano, em ensaios realizados na China, enquanto Tuch et al. (2000) calcularam valores entre 1,5 e 1,7 g/ml em medições efetuadas na Alemanha. Apesar deste valor de massa específica padrão do equipamento estar fora da faixa indicada na literatura, optou-se por manter a utilização dos dados conforme apresentados na tela do instrumento nas análises apresentadas no capítulo 5, no intuito de possibilitar a comparação com as medições dos parâmetros realizadas em eventos anteriores.

4.5.4. Medidor contínuo de parâmetros da QAI

Em paralelo às medições dos parâmetros com os equipamentos portáteis detalhados nos itens 4.5.1, 4.5.2 e 4.5.3, realizou-se também, durante os ensaios experimentais, o monitoramento das grandezas através do emprego de medidores contínuos de parâmetros da qualidade do ar. Os equipamentos foram disponibilizados pela empresa Omni Eletrônica, que forneceu todo o apoio técnico para a configuração e a instalação dos equipamentos no interior do ambiente e no ar externo durante os dias que antecederam aos ensaios.

Além dos dias de eventos, foi ainda disponibilizado um instrumento instalado na Sala A2 continuamente ao longo do ano, fornecendo dados 24 horas por dia, em tempo real. Esses dados auxiliam na compreensão do perfil de ocupação do ambiente ao longo do ano e na verificação da adequação do sistema de condicionamento de ar projetado às diferentes demandas de carga térmica a que o ambiente é submetido durante o ano.

As características técnicas principais do equipamento encontram-se detalhadas na Tabela 4.10, enquanto na Figura 4.27 pode-se visualizar um exemplo de sua instalação no interior da Sala A2 realizada durante ensaio experimental. Além dos níveis de concentração de contaminantes, o instrumento fornece ainda informações acerca de condições ambientais que influenciam na sensação de conforto geral dos ocupantes, adequando-se ao conceito de IEQ (Indoor Environmental Quality).

De uma forma geral, os seguintes parâmetros ambientais podem ser monitorados, conforme extraído de Omni-Eletrônica (2020):

- Temperatura de bulbo seco (TBS)
- Umidade relativa (UR)
- Concentração de dióxido de carbono (CO₂)
- Concentração de compostos orgânicos voláteis (COV ou VOC na sigla em inglês)
- Concentração de materiais particulados (PM₁₀, PM_{2,5} e PM₁)
- Nível de luminosidade no ambiente
- Nível de ruído no ambiente
- Sensor de presença

Tabela 4.10: Dados técnicos do multimetedor de parâmetros da QAI (GUILHOTTI, 2021).

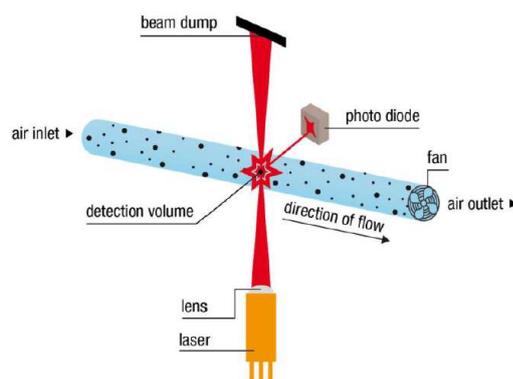
Dados Técnicos do Multimetedor de QAI			
Fabricante:	Omni Eletrônica		
Modelo:	Spiri		
Grandeza medida:	Temperatura Bulbo Seco	Umidade Relativa	Concentração de CO ₂
Faixa de Medição:	-40 a 100°C	0 a 100%	400 a 10.000 ppm
Exatidão:	± 0,2°C	± 3,5%	± (30 ppm + 3 % do valor medido)
Resolução:	0,1°C	1%	1 ppm

Figura 4.27: Exemplo de instalação dos multimetidores de QAI na Sala A2.



O sistema de medição de particulados do equipamento é realizado através de princípio óptico. Um feixe de luz é emitido por um laser, que sofre espalhamento pela passagem das partículas. Essa informação é coletada por um diodo fotodetector, para análise da contagem e dimensão dos elementos, de forma similar ao realizado pelo contador de partículas, detalhado no item 4.5.3. A tomada de ar para coleta de amostras é realizada pelo instrumento através de uma ventoinha, conforme esquema simplificado da Figura 4.28, diferindo do equipamento do item 4.5.3, onde essa tomada era realizada através de uma bomba de vácuo.

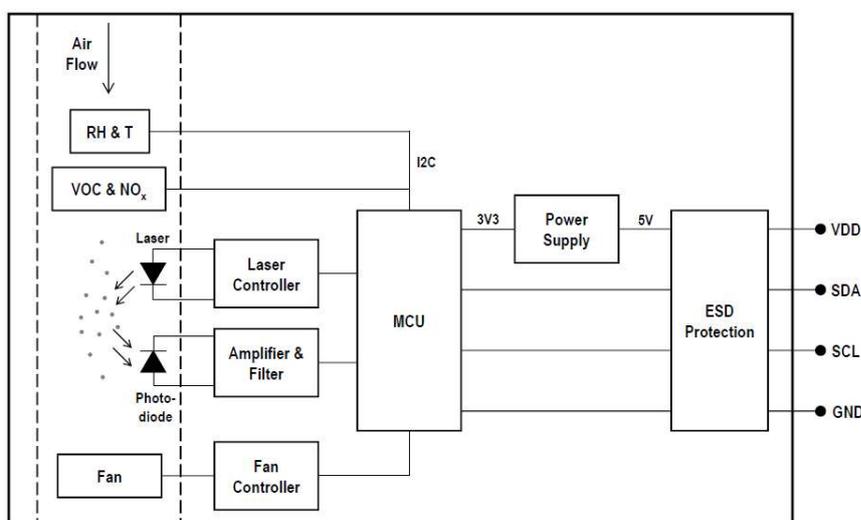
Figura 4.28: Sistema de contagem de partículas através de multimetedor de QAI (SENSIRION, 2020)



O sistema de coleta de amostra através do emprego de uma ventoinha apresenta as vantagens de permitir a construção de um equipamento mais compacto, reduzir os custos de fabricação e o consumo de energia e facilitar a manutenção e a substituição de peças do conjunto. Isso vai ao encontro dos objetivos do instrumento, de permitir um monitoramento contínuo, em tempo real, de parâmetros da qualidade do ar interior, promovendo uma grande base de dados para as tomadas de decisão por parte dos operadores e gestores dos sistemas de condicionamento de ar dos ambientes. Uma desvantagem desse tipo de tomada de ar é uma maior dificuldade para a leitura de particulados de maiores dimensões, como por exemplo o PM_{10} , que, em função de sua maior massa, apresenta maior resistência em ser coletado pelo equipamento.

Na Figura 4.29, pode-se visualizar o esquema funcional para um multimedidor de variáveis, modelo SEN5X, de princípio similar ao instrumento empregado nos experimentos. Neste esquema estão representados alguns dos componentes do sistema eletrônico embarcado no equipamento para a coleta e o tratamento dos dados dos diversos parâmetros monitorados.

Figura 4.29: Esquema funcional de um multimedidor de QAI (SENSIRION, 2022)



Em relação às incertezas referentes às medições de materiais particulados fornecidas pelo multimedidor, como o modelo de instrumento utilizado nos ensaios experimentais encontra-se em fase de desenvolvimento e constante aperfeiçoamento por parte do fabricante, os dados detalhados referentes às suas incertezas ainda não estão disponíveis.

Como referência, para o modelo de multimedidor cujo esquema funcional foi apresentado na Figura 4.29, o fabricante evita informar um valor de exatidão para o equipamento, em função da influência de diversos fatores, como índice de refração, formato das partículas, material do

particulado e outros. Estes fatores dificultam a comparação dos dados obtidos com aqueles realizados por outros métodos, como por exemplo os gravimétricos. Ao invés de “exatidão”, o fabricante opta por utilizar o termo “precisão”, que conforme Sensirion (2020) é calculada nos testes como o máximo desvio da medição de um sensor individual em relação à média dos valores obtidos de um lote de sensores, sob as mesmas condições de referência ambientais.

Na Tabela 4.11 são apresentados os dados de precisão do equipamento de referência fornecidos pelo fabricante para diferentes tamanhos de particulados. Como pode-se visualizar, a precisão para os particulados de maiores diâmetros é menor em relação aos particulados finos. Isso se dá em função das dificuldades de coleta desse tipo de partícula pelo instrumento, com sistema de ventoinha. Existe também uma variação da precisão do instrumento conforme as condições de temperatura ambiente se afastam da condição padrão utilizada nos testes.

Tabela 4.11: Dados de precisão de multimedidor de QAI para concentração de materiais particulados. (SENSIRION, 2022).

Dados de Precisão do Multimedidor para PMs	
Fabricante:	Sensirion
Modelo:	SEN5X
Princípio:	Diodo Laser
Tempo de amostra:	1,0 ± 0,03 s
Faixa de Tamanhos:	0,3 a 10µm
Faixa de Medição:	0 a 1.000 µg/m ³
Precisão de concentração mássica - PM ₁ e PM _{2,5}	± (5 µg/m ³ + 5%) p/ 0 a 100 µg/m ³ ± 10% p/ 100 a 1000 µg/m ³
Precisão de concentração mássica - PM ₄ e PM ₁₀	± 25µg/m ³ p/ 0 a 100 µg/m ³ ±25% p/ 100 a 1000 µg/m ³
Coefficiente para variação de temperatura de 25°C:	± (0,5% do valor medido) / °C

4.5.5. Vazão de ar externo de renovação

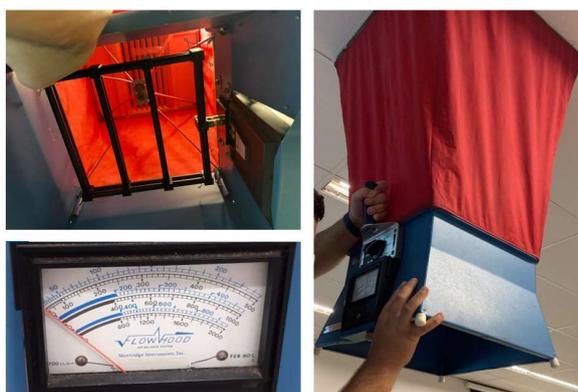
A vazão de ar externo insuflada pelas caixas de renovação de ar da Sala A2 durante os ensaios experimentais foi levantada utilizando-se um equipamento de medição do tipo coifa. Este instrumento possui uma lona que envolve e direciona o ar advindo dos difusores lineares de insuflamento para um “*manifold*” interno ao equipamento, que sente a estática e a pressão total em pontos de captação distribuídos uniformemente pela seção transversal do fluxo. Com os dados de pressão total e estática do fluxo, o equipamento verifica a pressão dinâmica do escoamento. Por meio de sistema de tubos de ar calibrado, o instrumento indica em “display” analógico as leituras de vazão, com ajuste em escalas que variam conforme a faixa de vazão.

Os principais dados técnicos do equipamento são apresentados na Tabela 4.12, enquanto na Figura 4.30 pode-se visualizar a estrutura interna do instrumento e seu “display” analógico. As escalas de leitura são dadas em cfm (em azul) e l/s (em preto). Pode-se visualizar também um exemplo de medição de vazão de ar em difusor da Sala A2, realizada pela equipe do LEQAI durante os ensaios experimentais. O procedimento adotado para correção dos valores de vazão, dadas as condições atmosféricas locais, encontra-se apresentado no Apêndice G.

Tabela 4.12: Dados técnicos do medidor de vazão de ar utilizado nos ensaios (SHORTRIDGE, 1990).

Dados Técnicos do Medidor de Vazão de Ar	
Fabricante:	Shortridge
Modelo:	CFM-83
Tipo:	Coifa
Princípio:	Pressão
Pontos de medição:	16
Faixa de Medição:	30 a 2.000 cfm 14 a 944 l/s (51 a 3.400 m ³ /h)
Escalas (unidade cfm):	30 a 500 cfm 400 a 1.000 cfm 800 a 2.000 cfm
Escalas (unidade l/s):	20 a 235 l/s 200 a 470 l/s 400 a 940 l/s
Exatidão:	± 3%
Resolução:	5 cfm - 2,5 l/s (9 m ³ /h)
Temperatura de referência:	70°F (21°C)
Pressão barométrica de referência:	760 mmHg (101,325 kPa)
Perda de carga introduzida:	0,19 mmca a 500 cfm

Figura 4.30: Exemplo de medição realizada com o medidor tipo coifa durante os ensaios.



4.5.6. Fungos viáveis

As coletas de material para análises biológicas, de levantamento dos fungos viáveis presentes no ar do interior do ambiente e no externo, foram realizadas através de um amostrador do tipo impactador de Andersen de um estágio. Os principais dados técnicos deste equipamento, que atende aos requisitos de coleta de material biológico detalhados em ANVISA (2003), são apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13: Dados técnicos do amostrador de bioaerossóis utilizado nos ensaios.

Dados Técnicos do Amostrador	
Tipo:	Andersen
Princípio:	Impactação
Estágios:	1
Coleta:	Placa de Petri
Meio de Cultura:	Ágar Dextrose
Vazão de Ar:	1 cfm (28,3 l/min)
Exatidão da Vazão de Ar:	$\pm 0,02$ l/min
Nº de Orifícios:	400
Faixa Coleta Bioaerossóis:	0,65 a 22 μ m

O instrumento possui em seu conjunto uma bomba de vácuo, que promove o fluxo de ar para o impactador, através de uma mangueira de conexão. A vazão de ar do sistema é regulada por meio de uma válvula de ajuste do tipo agulha presente na linha. Essa válvula é ajustada de forma a se atingir a vazão recomendada por ANVISA (2003), que pode ser verificada em campo através de um rotâmetro. A Figura 4.31 apresenta um esquema do princípio de coleta em um amostrador por impactação. Na Figura 4.32 pode ser visualizada foto do conjunto de coleta de bioaerossóis montado no experimento.

Figura 4.31: Princípio de coleta no amostrador por impactação (DIAS, 2010).

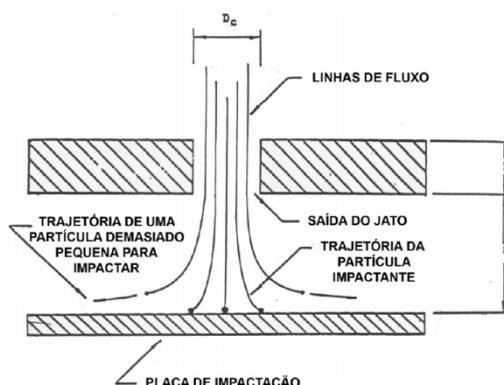
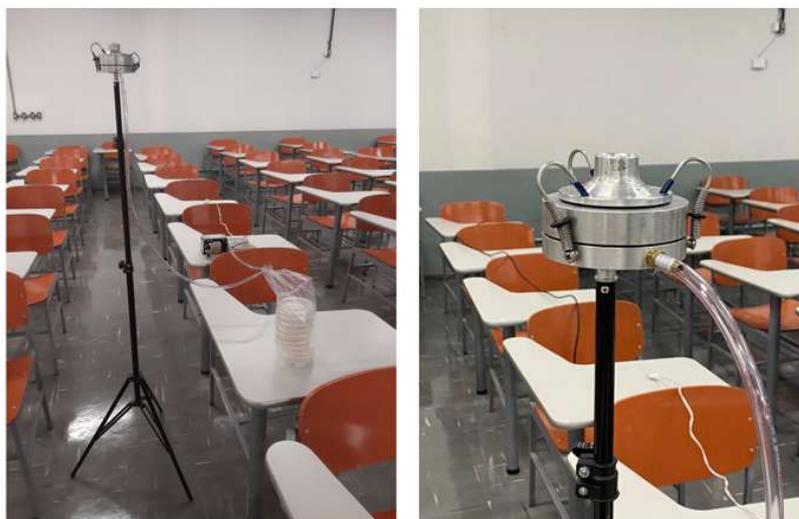


Figura 4.32: Conjunto de coleta de bioaerossóis montado na Sala A2 durante os ensaios.



O tempo de coleta da amostra, conforme recomendado em ANVISA (2003) pode variar entre 5 e 15 minutos, em função das especificações do amostrador e das condições de contaminação do local onde serão realizadas as amostras. Nos ensaios experimentais realizados na Sala A2, optou-se pela utilização de um tempo de coleta de 5 minutos, com a vazão de ar recomendada de 28,3 l/min, de forma a se atingir o volume mínimo de coleta de 140 litros exigido por ANVISA (2003). A escolha desse tempo de coleta foi realizada com o objetivo de possibilitar uma maior quantidade de medições e em função do nível de bioaerossóis esperado na sala ser relativamente elevado, quando comparado por exemplo a um ambiente de sala limpa.

Quanto ao número de pontos de medição, como o ambiente estudado possui área inferior a 1.000 m², conforme detalhado na Tabela 4.1, o número mínimo de pontos monitorados no interior do ambiente exigido por ANVISA (2003) é de 1 ponto. Nos ensaios experimentais realizados, contudo, para uma maior base de dados, optou-se pelo monitoramento de 2 pontos no interior do ambiente, além de um terceiro ponto no ambiente externo, conforme indicados na Figura 4.13 e na Figura 4.14, respectivamente.

Após as coletas realizadas durante os ensaios experimentais, as amostras foram encaminhadas para o laboratório da Conforlab Engenharia Ambiental, onde foram mantidas em incubadora para o crescimento dos fungos, pelo período de 7 dias, na temperatura de 25°C, conforme as condições de cultivo recomendadas por ANVISA (2003). Após este período de crescimento, realizou-se a contagem dos gêneros fúngicos, conforme detalhado no item 4.4.2.1. Com os elementos contados, deve-se dividir pelo volume de ar coletado, conforme Equação (4.4), para

obter os valores de concentração de fungos viáveis (c_{FV}) no ar, onde Q_b é a vazão da bomba de vácuo e t_a é o tempo de amostragem.

$$c_{FV} = \frac{N_{cont}}{Q_b * t_a} \quad (4.4)$$

Em resumo, o processo realizado para as análises de agentes biológicos efetuadas nos ensaios, vai ao encontro do método descrito em Dias (2010), replicado a seguir com adaptações:

- Uma placa de Petri, contendo um ágar apropriado aos microrganismos, é instalada no impactador;
- Aspira-se ar de amostragem através do impactador, por meio de uma bomba de vácuo operando em regime permanente, com vazão de ar em torno de 28,3 L/min, conforme recomendado por ANVISA (2003);
- O ar com as partículas viáveis entra no impactador e acelera através dos orifícios de jateamento;
- As partículas maiores são inercialmente impactadas e retidas na placa com ágar, enquanto as menores escapam para fora, conforme representado na Figura 4.32, através da saída na base do impactador e da mangueira da bomba;
- Após o término da amostragem, registra-se o tempo decorrido, remove-se a placa com a amostra, coloca-se a tampa de volta à placa e identifica-se a placa;
- A placa de Petri é incubada e contada em laboratório especializado. A contagem das partículas viáveis (fungos) é normalmente apresentada em termos de UFC (unidade de formação de colônias) ou CFU (*colony forming unit*), em inglês;
- Conhecendo-se os dados de fluxo de ar, tempo decorrido da amostragem e número de colônias (UFC), calcula-se, através da Equação (4.4), a concentração de bioaerossóis no ar do ambiente estudado, em termos de UFC/m³.

4.5.7. Velocidade e direção do vento

Os dados de velocidade e direção do vento foram coletados no ambiente externo durante o ensaio experimental de estudo da varrição pneumática, descrito no item 4.4.2, com o emprego de uma estação meteorológica portátil, cujos dados técnicos estão detalhados na Tabela 4.14. O fabricante não disponibilizou dados de exatidão. O objetivo desta medição foi de avaliar se as condições ambientais do dia do experimento, em relação às características do vento nos entornos do ambiente estudado (Sala A2), exerceram influência sobre os resultados obtidos.

Tabela 4.14: Dados técnicos da estação meteorológica (ACURITE, 2022).

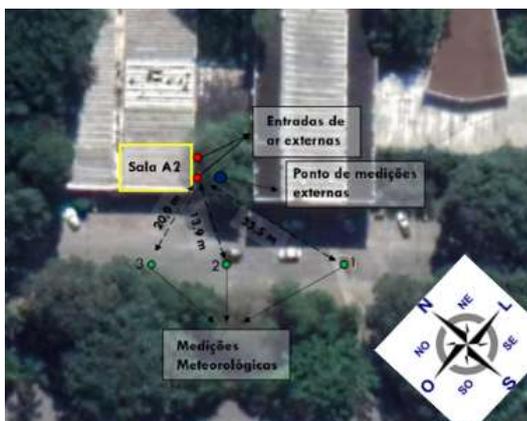
Dados Técnicos da Estação Meteorológica					
Fabricante:	Acurite				
Modelo:	02064C / 999143				
Tipo:	Estação Compacta Profissional				
Parâmetros:	Temperatura TBS	Umidade relativa	Velocidade do vento	Direção do vento	Precipitação
Faixa de Medição:	-40 a 70°C	1% a 99%	0 a 159 km/h	16 divisões	0 a 10 ⁵ mm
Resolução:	1°C	1%	1 km/h	~12°C	1 mm

Neste ensaio, como havia uma fonte pontual de contaminantes representada pelo soprador de folhas, a intensidade e a direção dos ventos no período dos ensaios poderiam provocar um maior ou menor direcionamento dos poluentes desta fonte até as tomadas de ar externo da sala, em função da posição do soprador. Na Figura 4.33, pode-se ver a estação meteorológica montada na área externa do estacionamento da EPUSP. Na Figura 4.34 são indicados os pontos onde a estação foi posicionada durante o experimento.

Figura 4.33: Estação meteorológica montada na área externa (VALENCIO E HERSCHANDER, 2021).



Figura 4.34: Pontos de medição meteorológica nos ensaios (adaptado de Argenton e Prado (2021)).



4.5.8. Distância

No experimento de estudo da varrição pneumática, descrito no item 4.4.2, devido à existência de uma fonte pontual de contaminantes a ser analisada, representada pelo soprador de folhas, foram monitorados ao longo do experimento os dados de distância do processo de varrição em relação às tomadas de ar externo da Sala A2. Na Tabela 4.15 apresenta-se o detalhamento das informações acerca do instrumento utilizado, cuja imagem pode ser visualizada na Figura 4.35. A exatidão do equipamento irá depender de como for operado e das irregularidades presentes no piso por onde será realizado o encaminhamento, sendo obtida maior exatidão para pisos lisos. O trajeto percorrido pelo operador do soprador de folhas durante o período do experimento pode ser visualizado na Figura 4.11. O processo de varrição foi iniciado em um ponto distante da sala, se aproximando ao longo da fase inicial do ensaio e posteriormente se afastando novamente, em direção aos outros prédios.

Tabela 4.15: Dados técnicos do medidor de distância utilizado no experimento.

Dados Técnicos do Medidor de Distância	
Tipo:	Trena de roda com totalizador
Display:	Analógico
Faixa de medição:	0 a 999,9 m
Resolução:	0,1m

Figura 4.35: Medidor de distâncias utilizado no experimento (VALENCIO E HERSCHANDER, 2021).



4.6. Análise de Incertezas

Para cada tipo de medida tomada durante os experimentos em campo, em função do modelo de instrumentação e do procedimento experimental utilizado, realizou-se uma análise detalhada acerca das incertezas envolvidas nos valores obtidos. Para tal utilizou-se como base o “Guia para Expressão de Incerteza de Medição”, disponível em INMETRO (2008).

O detalhamento do procedimento de cálculo das incertezas realizado para cada parâmetro da qualidade do ar monitorado encontra-se no Apêndice H, sendo abaixo apresentado um resumo dos valores de incerteza-padrão e incerteza expandida calculados para cada parâmetro.

4.6.1. Resumo das incertezas

Resumindo as informações acerca da definição das incertezas envolvidas nas medições dos diversos parâmetros, apresenta-se, na Tabela 4.16, um resumo dos valores de incerteza-padrão e incerteza expandida, para nível de confiança de 95%, obtidas para cada parâmetro e variável monitorados nos experimentos.

Para facilitar a visualização dos dados, os valores são apresentados em porcentagens, arredondados para uma casa decimal, onde aplicável. N_{ocup} se refere ao número de ocupantes no ambiente, cuja incerteza foi estimada com base no fluxo de pessoas entrando e saindo da sala durante os eventos.

Tabela 4.16: Resumo das incertezas calculadas para os parâmetros monitorados nos ensaios.

Tabela Resumo das Incertezas		
Parâmetro	Incerteza-Padrão (confiança: 68,3%)	Incerteza Expandida (confiança: 95%)
TBS	0,4 °C	0,8 °C
UR	1,5% de UR	3,0% de UR
P_{atm}	1,3 mbar	2,5 mbar
CO ₂	38 ppm + 1,5%	75 ppm + 3,0%
PM ₁₀	8,5%	16,6%
PM _{5,0}	9,4%	18,4%
PM _{2,5}	11,6%	22,8%
PM ₁	16,9%	33,1%
PM _{0,5}	31,4%	61,6%
FV	4,7%	9,2%
$m_{AE}(1 \text{ cx})$	1,5%	3,0%
$m_{AE}(2 \text{ cx})$	1,1%	2,1%
$m_{AE}(3 \text{ cx})$	0,9%	1,7%
$m_{AE}(4 \text{ cx})$	0,8%	1,5%
N_{ocup}	1 pessoa	2 pessoas

4.7. Análise de Correlações

Uma das técnicas utilizadas no estudo acerca do comportamento dos parâmetros monitorados ao longo dos ensaios experimentais será a análise das correlações verificadas entre a variação das grandezas, em função das condições de renovação de ar e de ocupantes do ambiente num dado momento. Para esse estudo de correlações, procurou-se definir subintervalos, dentro dos experimentos realizados, nos quais algumas das condições de contorno fossem similares, com o objetivo de reduzir o número de variáveis que influenciam o sistema. Por exemplo, instantes em que as vazões de renovação ou o tipo de atividade exercida pelos ocupantes, no ambiente condicionado, eram similares.

Para mensurar o grau de correlação entre os parâmetros em um dado intervalo de medições, utilizou-se como referência o cálculo do coeficiente de correlação linear de Pearson (R), dado pela divisão da covariância pelo desvio padrão de um par de variáveis x_i e y_i de uma amostra, conforme apresentado na Equação (4.5).

$$R = \frac{cov(x, y)}{S_x * S_y} \quad (4.5)$$

S_x e S_y são os desvios padrão calculados para cada variável e $cov(x, y)$ a covariância, dados respectivamente pelas expressões a seguir:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad ; \quad S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}} \quad (4.6)$$

$$S_{xy} = cov(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})]}{n - 1} \quad (4.7)$$

Dessa forma, desenvolvendo-se a Equação (4.5), com base nas definições das Equações (4.6) e (4.7), chega-se à expressão para cálculo do coeficiente de correlação linear de Pearson, dado pela Equação (4.8).

$$R = \frac{[n * \sum_{i=1}^n (x_i * y_i)] - [(\sum_{i=1}^n x_i) * (\sum_{i=1}^n y_i)]}{\sqrt{[(n * \sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2] * [(n * \sum_{i=1}^n y_i^2) - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}} \quad (4.8)$$

Podem ser encontrados na literatura diferentes métodos para a análise de correlações entre variáveis, incluindo casos não lineares, conforme detalhado em Longeaux (2020) e Chen et al. (2010). O emprego de um coeficiente de correlação linear nas análises realizadas durante os experimentos é justificado em função da tendência de variação linear do comportamento da concentração de contaminantes no ambiente condicionado, para o caso de regime permanente.

As condições dos parâmetros são influenciadas pelas condições do ar externo, pela vazão de renovação de ar empregada e pela taxa de produção interna de contaminantes, relacionada ao número de ocupantes e às atividades realizadas, conforme modelo teórico apresentado no Apêndice E.

O valor coeficiente de correlação de Pearson pode oscilar entre -1 (correlação linear negativa perfeita) e +1 (correlação linear positiva perfeita). Na Tabela 4.17 são fornecidas as interpretações para cada faixa de valores em que o coeficiente de correlação calculado pode estar posicionado.

Cabe-se destacar, conforme ressaltado em Costa Neto (2002), que muitas vezes um valor alto obtido do coeficiente de correlação, embora estatisticamente significativo, pode não implicar em qualquer relação de causa e efeito entre as variáveis, mas simplesmente em uma tendência de variação conjunta. Dessa forma, os resultados obtidos devem ser analisados com cautela.

Tabela 4.17: Significado numérico do coeficiente de correlação linear de Pearson.

Significado Numérico do Coeficiente de Correlação Linear De Pearson (R)	
Variação de r de -1 a +1 para duas grandezas A e B	
$R \sim 0$	Não há correlação significativa entre as grandezas A e B .
$R \sim 1$	Há correlação direta (positiva) entre A e B : A cresce e B cresce com a mesma intensidade.
$R \sim -1$	Há correlação inversa (negativa) entre A e B : A cresce e B decresce com a mesma intensidade.
$0 < R < 1$	Há correlação direta, mas com diferentes intensidades: A cresce e B cresce com intensidade maior ou menor.
$-1 < R < 0$	Há correlação inversa, mas com diferentes intensidades: A cresce e B decresce com intensidade maior ou menor.

Para sistemas com diversas variáveis, um método que pode ser empregado nas análises é o da montagem de uma matriz de correlação. Conforme proposto em Chernick e Friis (2003), esse tipo de matriz retrata todas as combinações bivariadas possíveis de um conjunto de variáveis, a fim de verificar padrões de associações interessantes para um estudo mais aprofundado. A matriz elaborada será simétrica, com os valores da diagonal principal sempre iguais a 1, dado retratar a correlação de uma variável com ela mesma, conforme presente na Tabela 4.18.

Tabela 4.18: Exemplo de formato de matriz de correlação para um sistema com multivariáveis.

Formato de matriz de correlação para n variáveis				
R	x_1	x_2	...	x_n
x_1	1	a_{12}	a_{1i}	a_{1n}
x_2	a_{12}	1	a_{2i}	a_{2n}
...	a_{1i}	a_{2i}	1	a_{in}
x_n	a_{1n}	a_{2n}	a_{in}	1

4.7.1. Intervalos de confiança

O processo de determinação das incertezas referentes aos valores experimentais de cada parâmetro foi detalhado ao longo do item 4.6, sendo seu resumo apresentado na Tabela 4.16. Neste presente item, será apresentado o método utilizado para o cálculo de intervalos de confiança para os valores do coeficiente de correlação linear de Pearson, em função da análise estatística do tamanho da amostra de dados utilizada como base para a sua determinação.

Para o cálculo destes intervalos de confiança será adotada uma distribuição amostral do tipo “t de Student”, calculada utilizando-se o desvio padrão da amostra em sua determinação, como detalhado na Equação (4.9). Vale-se ressaltar que, na medida em que o número de elemento da amostra (n) cresce, a forma da curva tende a se aproximar a uma distribuição normal reduzida, conforme ilustrado em Costa Neto (2002).

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{S_x/\sqrt{n}} \quad (4.9)$$

Para a realização de testes de hipótese sobre o coeficiente de correlação linear de Pearson, será aplicada a transformação de Fisher, detalhada na Equação (4.10). Ela é obtida por meio de uma tangente hiperbólica, que aproxima os valores de correlação de uma distribuição normal, facilitando o trabalho estatístico para cálculo dos intervalos de confiança. Outros métodos de transformação podem ser verificados na literatura, conforme Bishara e Hittner (2016). Para a aplicação estudada, como a hipótese de distribuição Gaussiana de erros para as variáveis analisadas, considerou-se a transformação de Fisher como uma boa aproximação.

$$z = \frac{1}{2} * \ln\left(\frac{1 + R}{1 - R}\right) = \operatorname{arctanh}(R) \quad (4.10)$$

Com a hipótese da distribuição normal para as variáveis, o desvio padrão para a distribuição z pode ser calculado através da Equação (4.11). Percebe-se que a amplitude do erro será função do tamanho da amostra, tendendo a ser reduzida com o aumento do número de elementos (n) da amostra de dados utilizada. A título de ilustração do impacto do tamanho da amostra, para um dado coeficiente de Pearson $R = 0,75$, o intervalo de 95% de confiança para $n = 50$ será de $0,60 < R < 0,85$, enquanto para $n = 200$ esse intervalo será de $0,68 < R < 0,80$. Neste exemplo, verifica-se uma redução pela metade do intervalo com a quadruplicação da amostra.

$$\sigma(z) = \sqrt{\frac{1}{n - 3}} \quad (4.11)$$

Conforme exemplo apresentado, será utilizado no presente estudo um intervalo de confiança de 95% para determinação da faixa de valores do coeficiente de correlação. Aplicando-se a tabela da distribuição “t de Student”, para $P = 0,025$, tendendo para uma distribuição normal, em função da transformação de Fisher, chega-se a um fator de 1,96, a ser aplicado sobre o desvio padrão obtido pela Equação (4.11).

Com o intervalo determinado para a variável z , basta então realizar a transformação inversa, descrita na Equação (4.12), sobre os limites do intervalo calculado, para obter-se os valores do intervalo de confiança para a variável original (R) do coeficiente de correlação de Pearson.

$$R = \frac{e^{2*z} - 1}{e^{2*z} + 1} = \tanh(z) \quad (4.12)$$

5. RESULTADOS DOS ENSAIOS E ANÁLISES

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para os parâmetros da qualidade do ar monitorados durante os experimentos, por meio de gráficos que ilustram o comportamento de cada parâmetro nos ensaios. São realizadas discussões acerca dos resultados, na medida em que os dados obtidos são apresentados, relacionando-os, sempre que possível, com os valores de referência para cada parâmetro, apresentados ao longo da revisão bibliográfica do Item 3.1. Para os contaminantes, como dióxido de carbono, materiais particulados e fungos viáveis, são utilizados como linhas de referência nos gráficos os valores máximos admitidos pela legislação brasileira, dados por ANVISA (2003) e CONAMA (2018).

5.1. Medições nos Eventos de Oficinas

Os procedimentos de medição utilizados nos eventos das Oficinas de Carrinhos de Rolimã e Oficinas de Brinquedos foram detalhados no Item 4.4.1. Estes eventos envolveram atividades de ensino referentes a duas principais tarefas: elaboração de projetos e fabricação de protótipos.

5.1.1. Oficinas de Carrinhos de Rolimã

Para as Oficinas de Carrinhos de Rolimã, foram monitorados os parâmetros de qualidade do ar interior e do ar externo ao longo das sucessivas edições do evento. Os dados apresentados de 2016 e 2017 foram obtidos em trabalhos anteriores de membros do LEQAI, em Fakhoury (2017) e Dal Pogeto (2018). No presente trabalho foram realizadas as medições dos dados referentes ao ano de 2018. Com o advento da pandemia, novas edições não puderam ser realizadas, em função da limitação de ocupantes em ambientes fechados e aulas transferidas para a modalidade remota. Todas as medições ocorreram no ambiente da Sala de Aula A2, localizado no Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), cujos dados construtivos podem ser verificados no item 4.3.1.

No ano de 2015, também foi realizado o monitoramento das condições da qualidade do ar ao longo do evento, porém o sistema de condicionamento de ar da sala ainda não se encontrava instalado, tendo sido empregada a ventilação natural para a climatização da sala na ocasião. Por este motivo, os dados de medição desse ano não são apresentados na presente análise, podendo ser verificados em Bordini (2015).

Os dados detalhados das edições de 2016 e 2017, apresentados a título de comparação ao longo das análises apresentadas dos parâmetros, podem ser visualizados em Fakhoury (2017) e Dal Pogeto (2018). Os parâmetros de qualidade do ar interior monitorados ao longo das edições do evento foram: condições psicrométricas (temperatura de bulbo seco e umidade relativa), concentração de CO₂ e concentrações de materiais particulados classe PM₁₀ e PM_{2,5}. Os resultados obtidos para cada parâmetro e as vazões de ar empregadas ao longo dos ensaios são apresentados na sequência.

5.1.1.1. Temperatura e umidade relativa

Os valores de temperatura de bulbo seco monitorados durante as edições do evento de 2016, 2017 e 2018 são apresentados nos Gráficos 5.1, 5.2 e 5.3, respectivamente. Os valores de umidade relativa são apresentados nos Gráficos 5.4, 5.5 e 5.6. Pode-se visualizar, em relação a ambos os parâmetros, a tendência de as curvas das grandezas medidas no interior da sala (linhas grossas) acompanharem o formato da variação do ar exterior (linhas tracejadas), indicando assim uma correlação entre essas características no interior e exterior do ambiente.

Os condicionadores de ar, contudo, tiveram êxito ao manter as condições de temperatura no interior da sala dentro de condições de conforto, entre 22 e 25°C, conforme apresentado no Item 3.2, apesar das condições no ambiente externo terem estado em geral fora desta faixa ao longo dos eventos.

Gráfico 5.1: Variação da temperatura de bulbo seco durante a edição de 2016 da Oficina de Rolimã (baseado em dados de medições de Fakhoury (2017)).

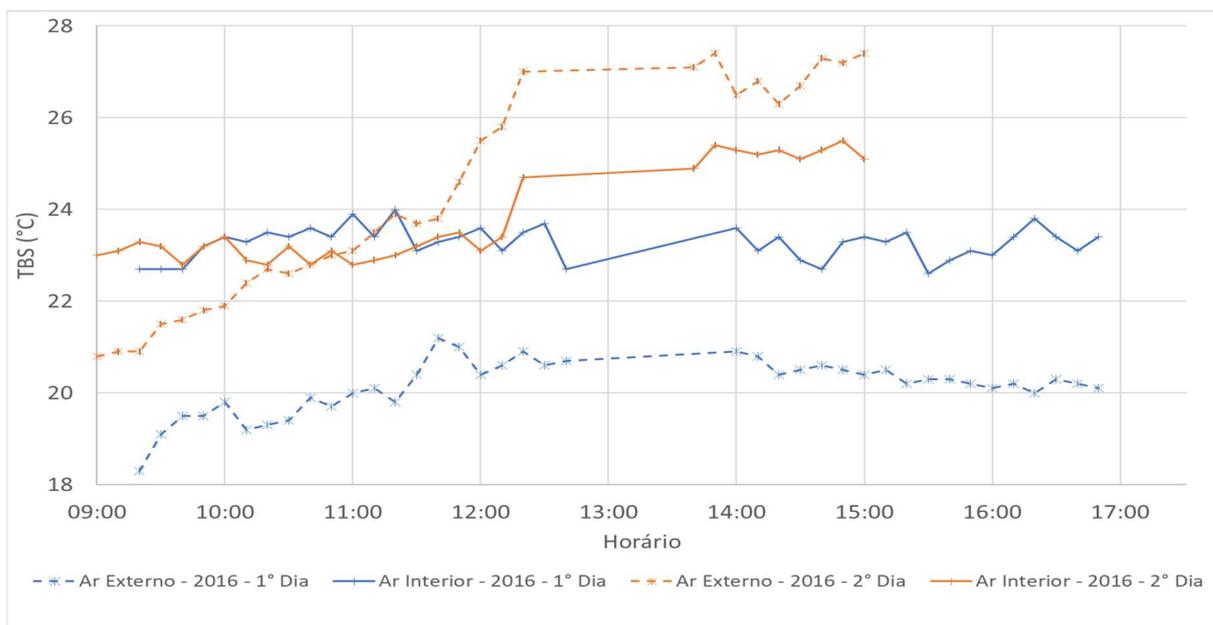


Gráfico 5.2: Variação da temperatura de bulbo seco durante a edição de 2017 da Oficina de Rolimã (baseado em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).

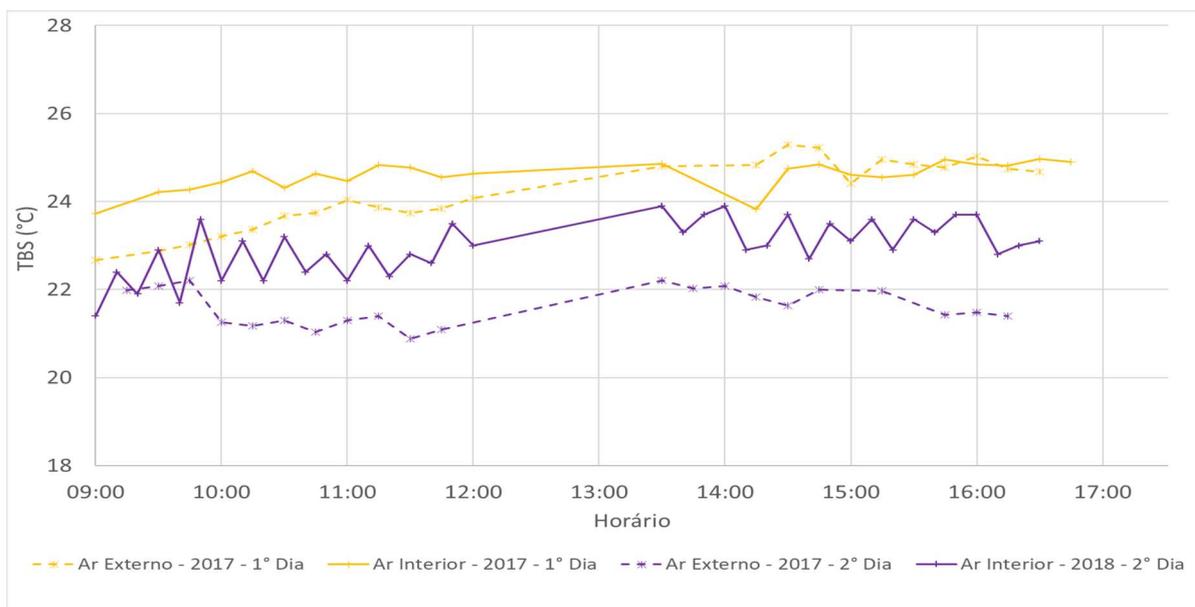
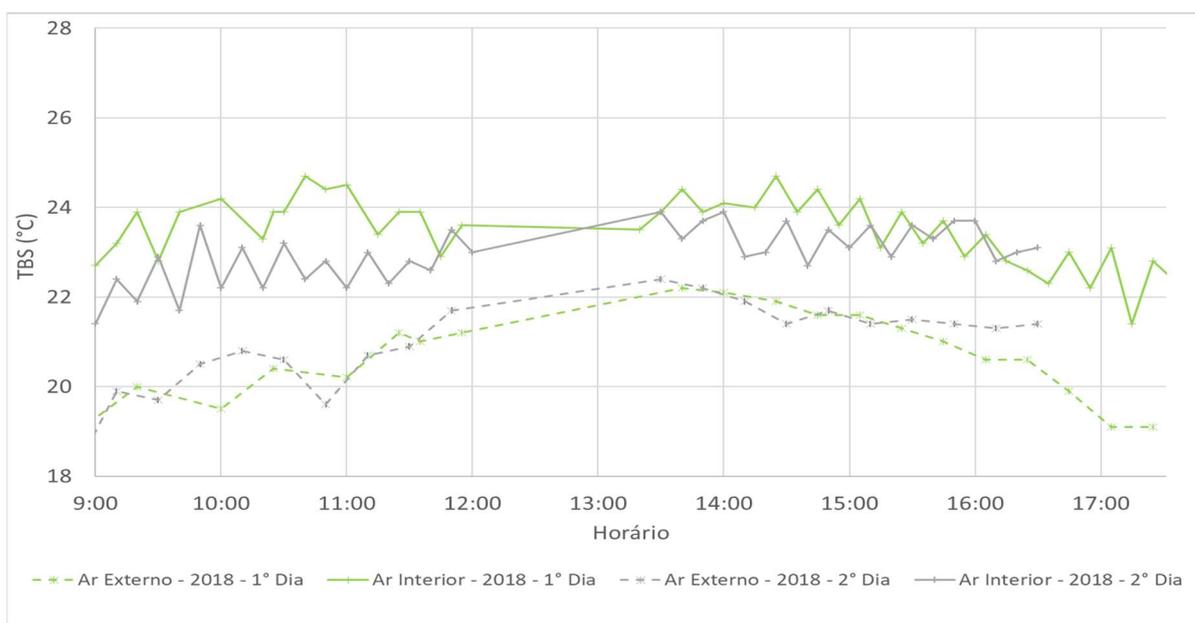


Gráfico 5.3: Variação da temperatura de bulbo seco durante a edição de 2018 da Oficina de Rolimã.



Em relação à umidade relativa no interior da sala, visualiza-se, nos Gráficos 5.4, 5.5 e 5.6, que o sistema de condicionamento de ar também obteve êxito em manter as condições de umidade dentro da faixa recomendada para o verão por ANVISA (2003) e NBR 16401 (ABNT, 2008), de 40% a 65%, conforme detalhado no Item 3.2, com exceção do 2º Dia do evento de 2017, do Gráfico 5.5. Dessa forma, corrobora-se que, de uma forma geral, os condicionadores de ar projetados para a sala se encontram bem dimensionados para atender às demandas de carga térmica do evento.

Gráfico 5.4: Variação da umidade relativa durante a edição de 2016 da Oficina de Rolimã (baseado em dados de medições de Fakhoury (2017)).

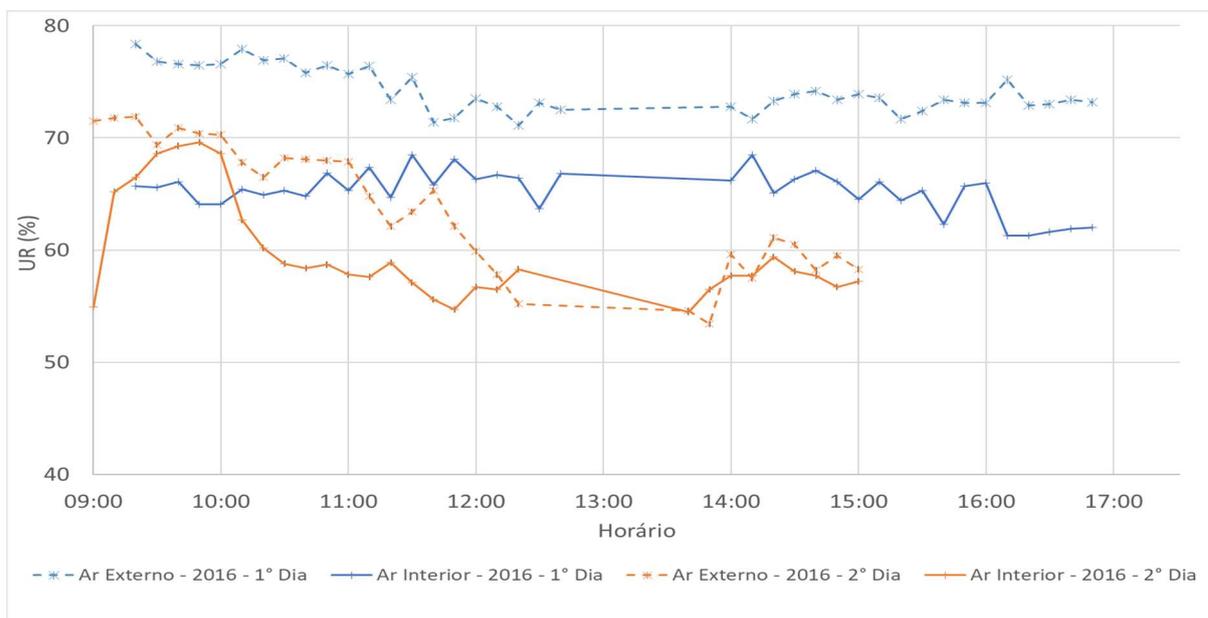


Gráfico 5.5: Variação da umidade relativa durante a edição de 2017 da Oficina de Rolimã (baseado em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).

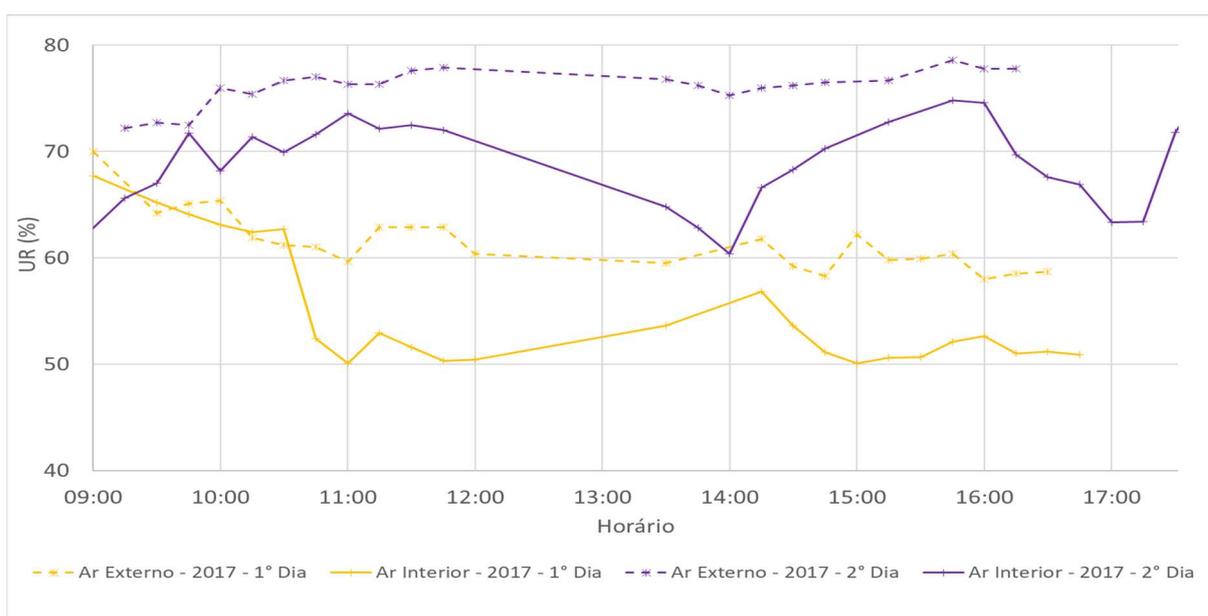
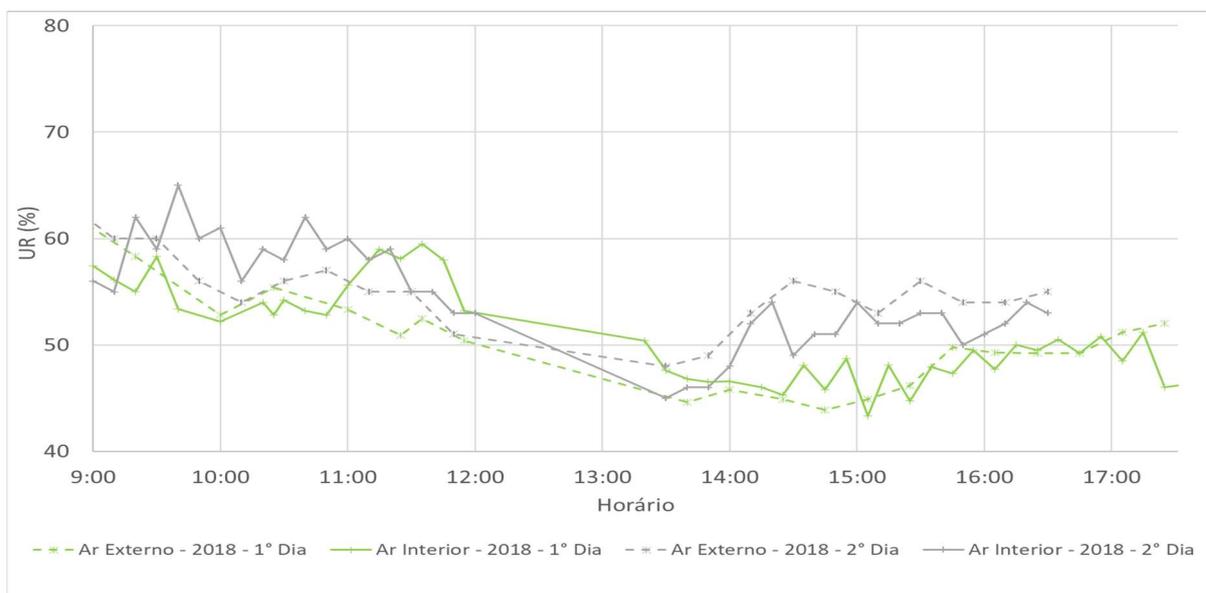


Gráfico 5.6: Variação da umidade relativa durante a edição de 2018 da Oficina de Rolimã.



5.1.1.2. Vazão de ar externo de renovação

Os Gráficos 5.7, 5.8 e 5.9, apresentam os valores de renovação de ar, divididos em três perfis de variação da vazão de ar externo empregados ao longo dos eventos. Nos Gráficos 5.10, 5.11 e 5.12, por sua vez, são apresentados os valores específicos pelo número de ocupantes, em $\text{m}^3/\text{h}/\text{pessoa}$, de forma a facilitar a comparação com os valores de referência recomendados pelas principais normas técnicas, apresentados no Item 3.5.1. As alterações de vazão realizadas durante os eventos foram efetuadas variando-se o número de caixas de renovação de ar em operação, em cada dado momento.

As faixas de vazão empregadas foram selecionadas de forma a permitir a análise de distintas condições de renovação de ar, proporcionando assim a verificação dos efeitos de diferentes taxas de renovação sobre as concentrações dos poluentes, desde um caso extremo de um ambiente sem renovação de ar até casos com altas vazões específicas de ar externo.

O período descontínuo nos Gráficos 5.10, 5.11 e 5.12 refere-se ao horário de almoço, no qual os ocupantes deixaram o ambiente monitorado para se dirigir ao refeitório. Encontra-se ainda apontada a faixa do valor mínimo de vazão estipulado pela RE-09 (ANVISA, 2003), de $27 \text{ m}^3/\text{h}/\text{pessoa}$.

Gráfico 5.7: Perfil A de variação da vazão de ar externo durante as edições da Oficina de Rolimã (curva de 2016 baseada em dados de medições de Fakhoury (2017)).

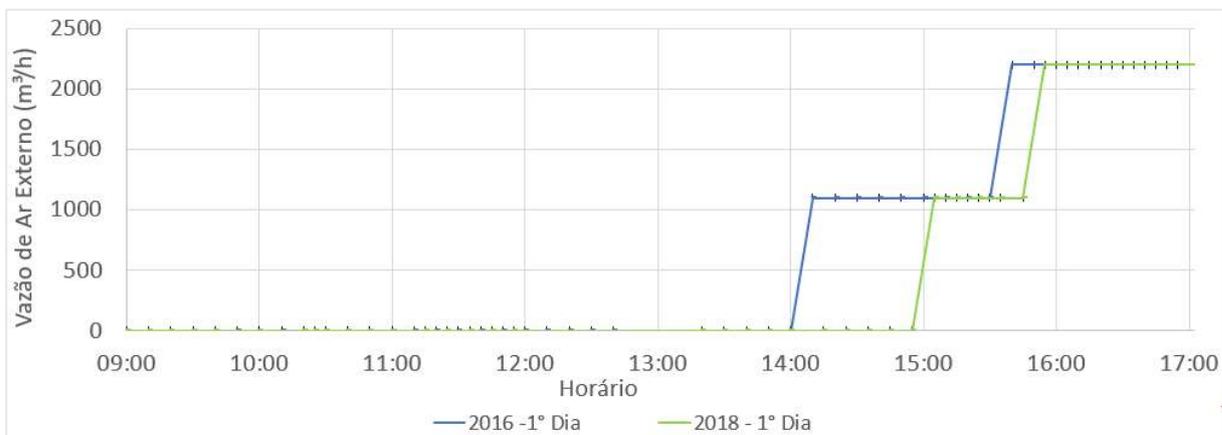


Gráfico 5.8: Perfil B de variação da vazão de ar externo durante as edições da Oficina de Rolimã (curva de 2016 baseada em dados de medições de Fakhoury (2017)).

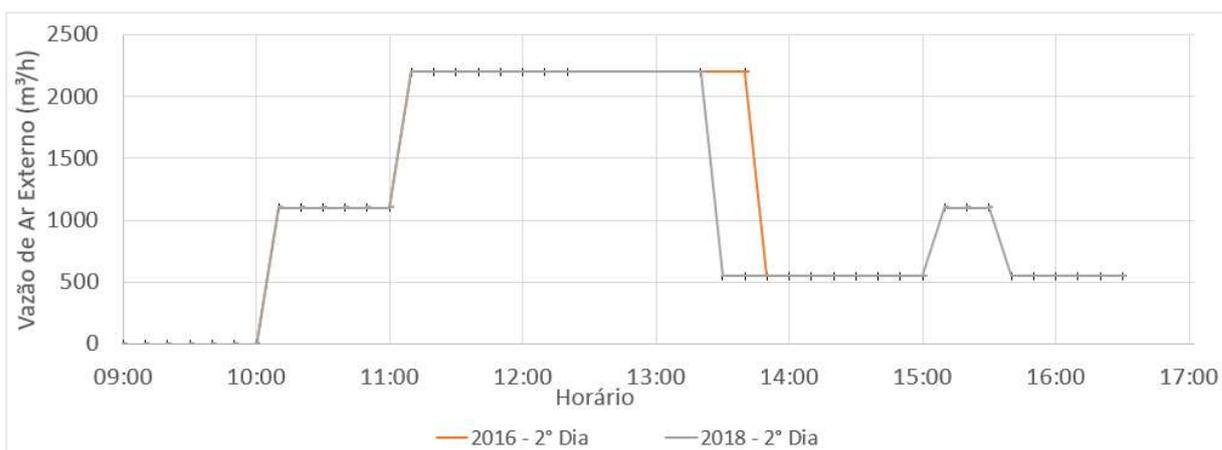


Gráfico 5.9: Perfil C de variação da vazão de ar externo durante as edições da Oficina de Rolimã (baseado em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).



Gráfico 5.10: Variação da vazão de ar externo por ocupante para Perfil A de vazão (curva de 2016 baseada em dados de medições de Fakhoury (2017)).

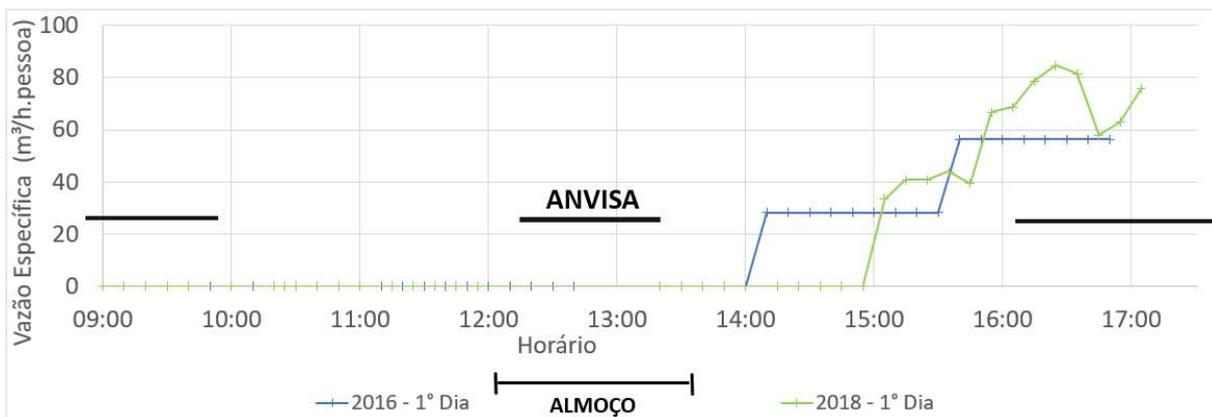


Gráfico 5.11: Variação da vazão de ar externo por ocupante para Perfil B de vazão (curva de 2016 baseada em dados de medições de Fakhoury (2017)).

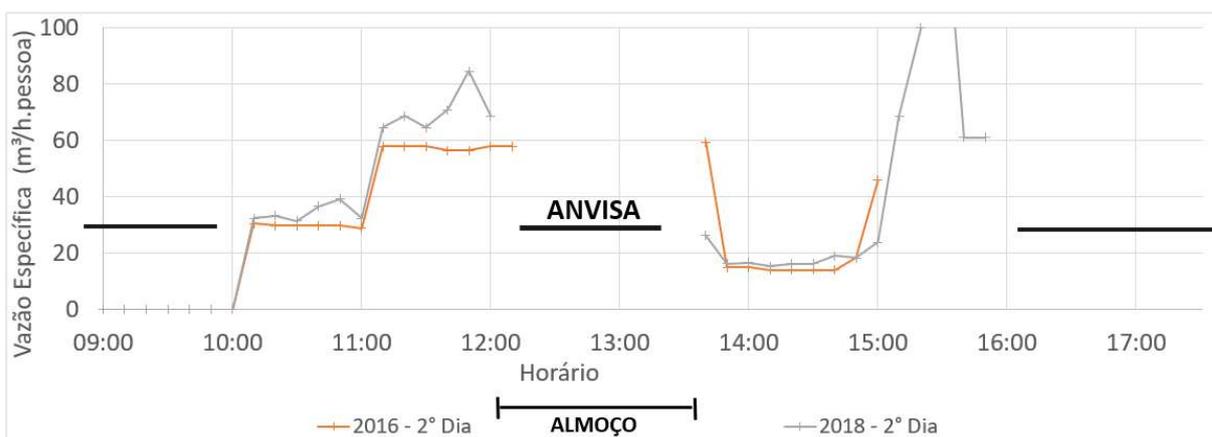
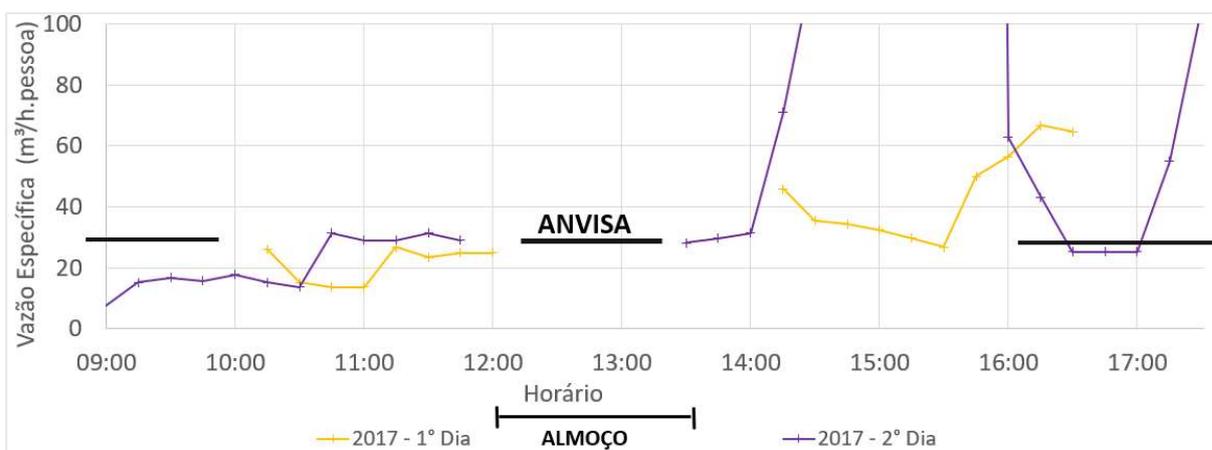


Gráfico 5.12: Variação da vazão de ar externo por ocupante para Perfil C de vazão (baseado em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).



5.1.1.3. Concentração de CO₂

As variações da concentração de dióxido de carbono (CO₂) no interior da sala e no ar externo, durante os eventos, para as edições de 2016, 2017 e 2018, são apresentadas nos Gráficos 5.13, 5.14 e 5.15. No período da manhã do 1º Dia das edições de 2016 e 2018, bem como no início do 2º Dia, a vazão de ar externo foi mantida nula para avaliar o efeito da geração de CO₂ pelos ocupantes, sem a interferência do efeito de dissipação promovido pelo ar de externo.

Gráfico 5.13: Variação da concentração de CO₂ durante a edição de 2016 da Oficina de Rolimã (baseado em dados de medições de Fakhoury (2017)).

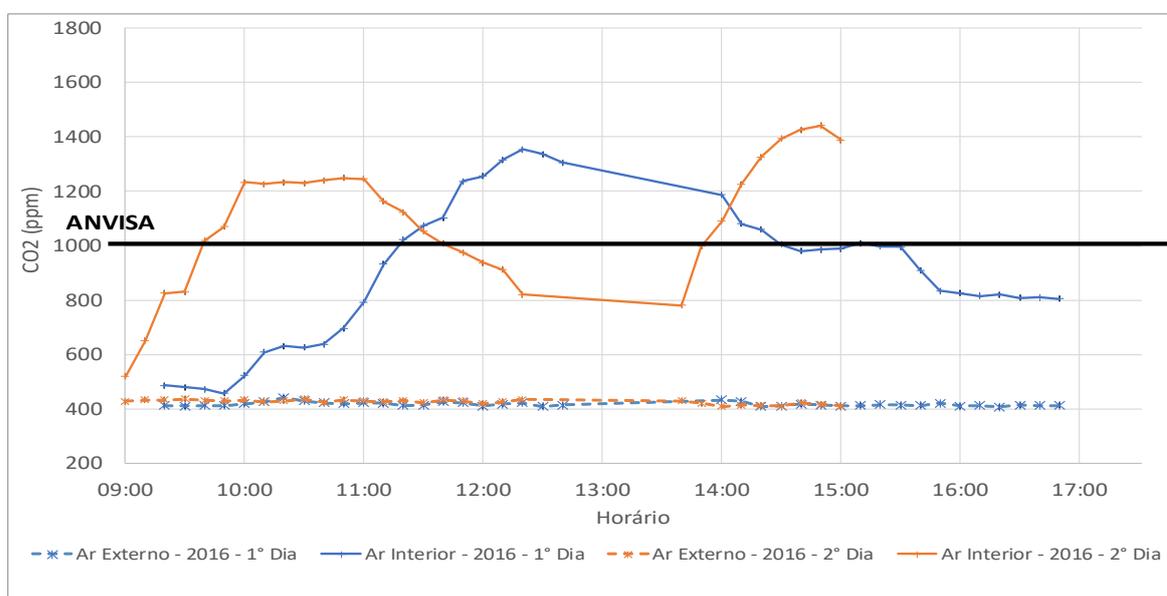


Gráfico 5.14: Variação da concentração de CO₂ durante a edição de 2017 da Oficina de Rolimã (baseado em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).

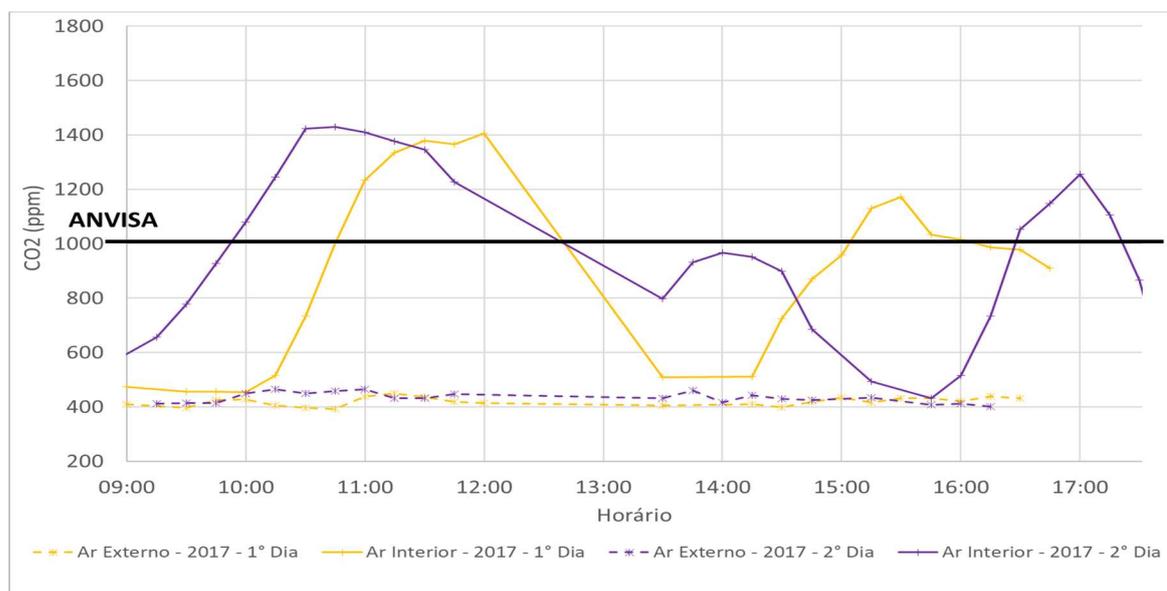
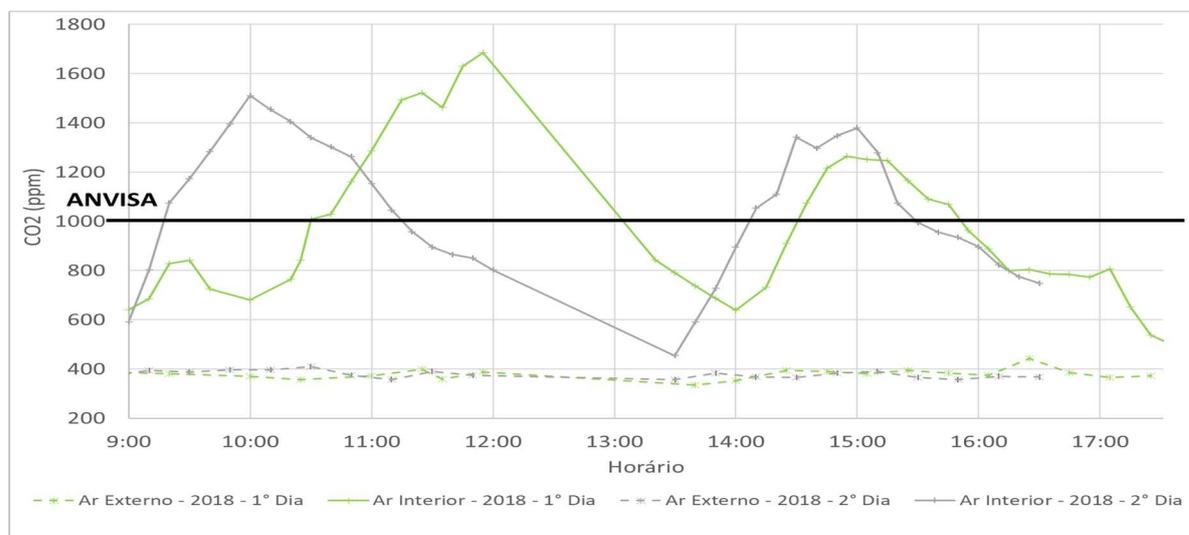


Gráfico 5.15: Variação da concentração de CO₂ durante a edição de 2018 da Oficina de Rolimã.



Nestes períodos sem renovação, pode ser verificado nos Gráficos 5.13, 5.14 e 5.15 um crescimento elevado da concentração de CO₂ interno, logo suplantando o limite máximo de 1.000 ppm, estipulado pela Resolução RE-09 (ANVISA, 2003), corroborando assim a importância da renovação de ar em ambientes de ensino. A taxa de crescimento da concentração de CO₂ variou de acordo com o tipo de atividade realizada pelos ocupantes, de repouso até fabricação intensa, oscilando entre 12 e 22 ppm/h/pessoa.

No evento de 2016, presente no Gráfico 5.13, entre as 14:15 e as 15:35 do 1º dia e as 10:15 e as 11:15 do 2º dia, as vazões específicas de renovação de ar mantiveram-se muito próximas do nível exigido por ANVISA (2003), de 27 m³/(h*pessoa). Pode-se visualizar que, com essa taxa de vazão, a concentração de CO₂ na sala manteve-se a um nível praticamente constante em ambos os casos, sugerindo que este valor proposto é adequado para nível de CO₂ no ambiente dentro de valores aceitáveis. Essa taxa de vazão, contudo, mostrou-se insuficiente para diminuir o nível de concentração quando esta encontra-se acima do limite, conforme curva do 2º Dia, com seu valor sendo mantido ao redor de 1200 ppm.

Com o aumento da taxa de renovação, pode-se visualizar, ao comparar-se o comportamento das curvas dos Gráficos 5.13, 5.14 e 5.15 com a vazão de ar específica dos Gráficos 5.10, 5.11 e 5.12, que a inclinação das curvas de decaimento de CO₂ aumenta com a elevação da taxa de renovação de ar. É, assim, possível perceber uma correlação negativa entre estas grandezas. Em relação à qualidade do ar externo, por sua vez, verifica-se que a concentração do CO₂ no ar exterior manteve-se em níveis na faixa entre 350 e 500 ppm, indicando que sua influência foi mínima nas variações visualizadas na concentração de CO₂ no interior da sala.

5.1.1.4. Concentração de particulados (PMs)

Em relação aos materiais particulados (PMs), monitorados no interior do ambiente e na área externa, os valores obtidos para PM_{10} nas medições são apresentados nos Gráficos 5.16, 5.17 e 5.18, para as edições de 2016, 2017 e 2018 respectivamente. Já os valores para $PM_{2,5}$ são apresentados nos Gráficos 5.19, 5.20 e 5.21. As marcações através de barras na parte inferior dos gráficos referem-se aos períodos em que foram realizadas atividades de fabricação, com a intensificação da produção de particulados no interior do ambiente nestes momentos.

Gráfico 5.16: Variação da concentração de PM_{10} durante a edição de 2016 da Oficina de Rolimã (baseado em dados de medições de Fakhoury (2017)).

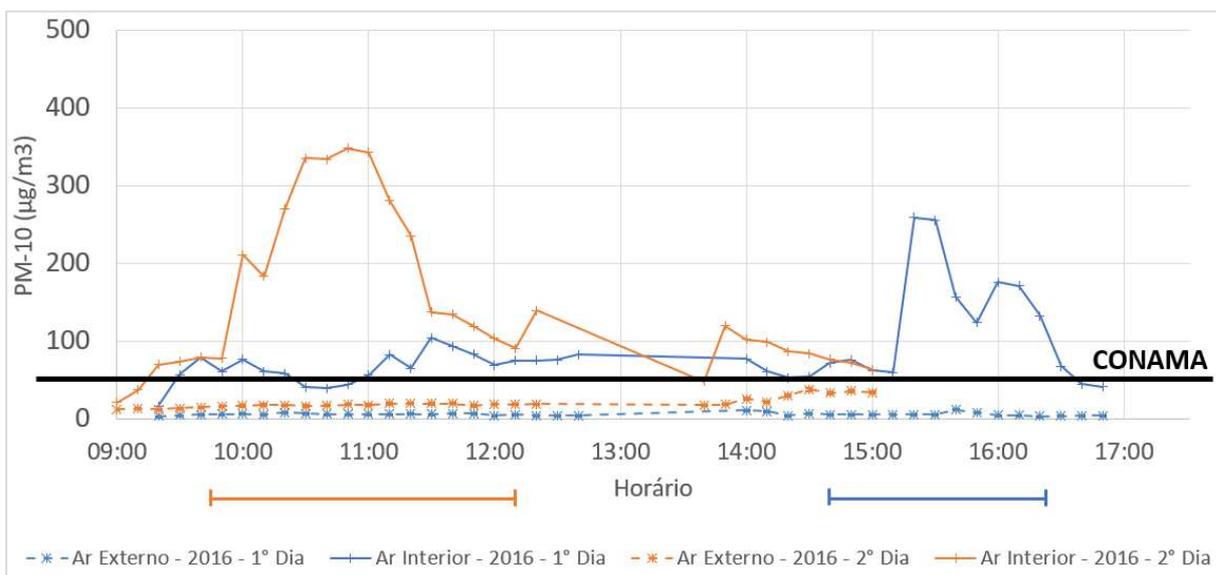


Gráfico 5.17: Variação da concentração de PM_{10} durante a edição de 2017 da Oficina de Rolimã (baseado em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).

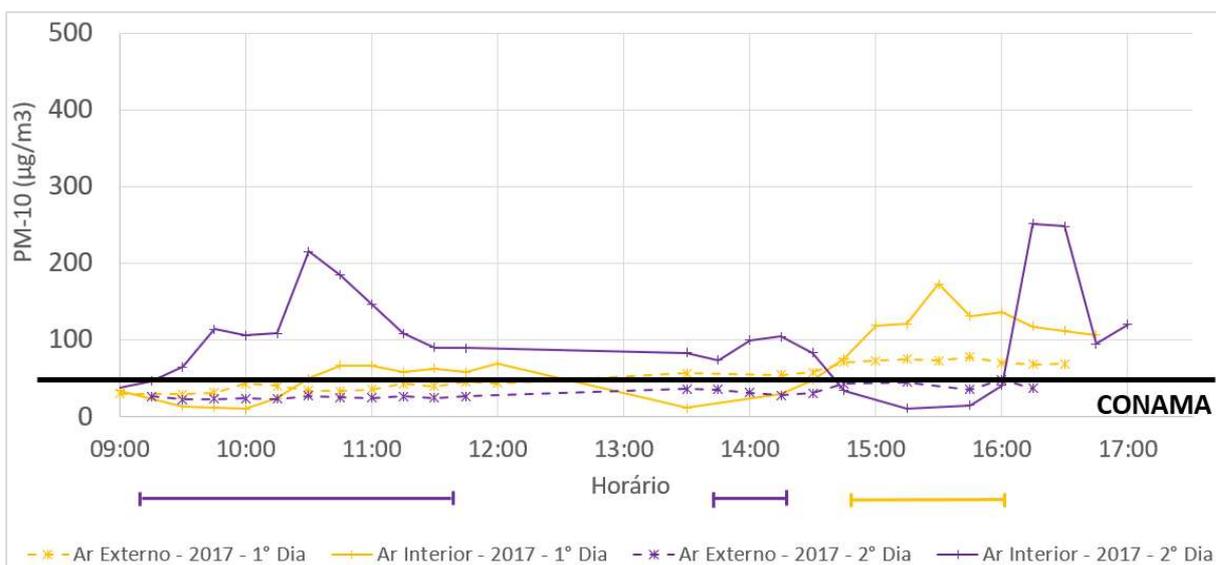
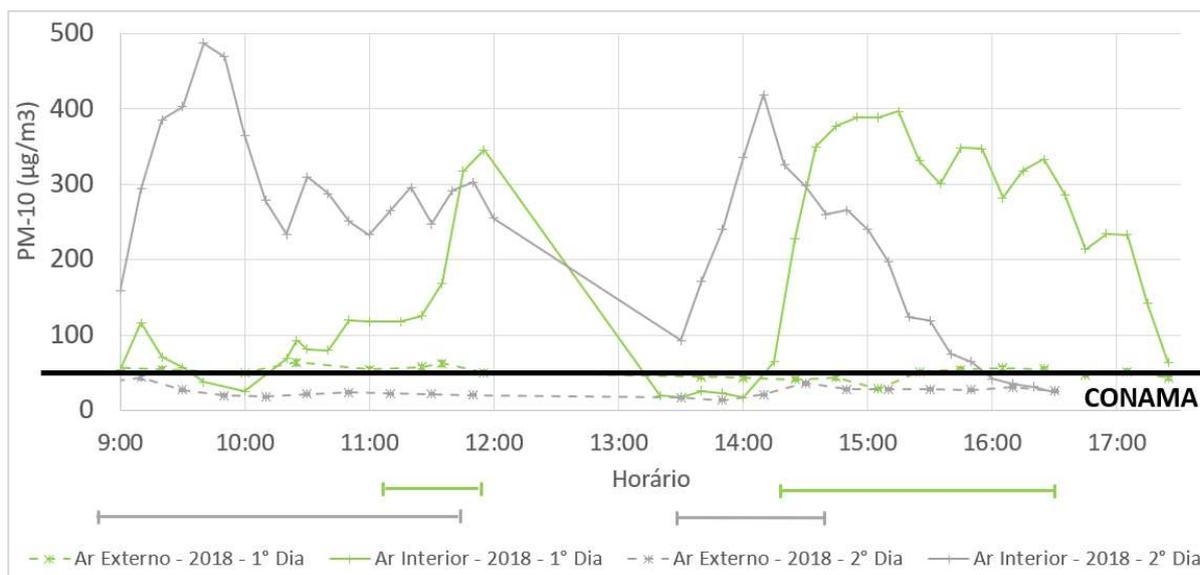


Gráfico 5.18: Variação da concentração de PM₁₀ durante a edição de 2018 da Oficina de Rolimã.



Analisando os gráficos acima da concentração de materiais particulados, em conjunto com os Gráficos 5.10, 5.11 e 5.12, referentes às vazões específicas de ar externo em cada período, vemos que, conforme verificado para o CO₂, a concentração de PM₁₀ atingiu rapidamente níveis superiores ao limite de 50 µg/m³ recomendado como padrão final (PF) pela Resolução N° 491 (CONAMA, 2018) e pela Norma NBR16401 (ABNT, 2008), nos momentos sem renovação de ar, mesmo sem atividades de fabricação em curso. Alcançaram-se níveis de PM₁₀ de até 500 µg/m³, 10 vezes superior ao requerido, nos momentos de intensa atividade de fabricação. O detalhamento dos níveis de particulados recomendados pelas diferentes Normas e legislações foi apresentado no Item 3.4.1.

O nível de PM₁₀ no ambiente teve uma forte alta nos horários em que a vazão foi mantida próxima àquela exigida por ANVISA (2003), de 27 m³/(h* pessoa), entre as 14:15 e as 15:35 do 1º Dia e entre as 10:15 e as 11:15 do 2º Dia de 2016 (Gráficos 5.10 e 5.11), diferentemente do verificado para o CO₂. Isso pode ser bem visualizado na curva do 2º Dia (Gráfico 5.18), indicando que a taxa de renovação da Resolução RE-09 (ANVISA, 2003) não foi suficiente para o controle do PM₁₀ na sala.

Dessa forma, verifica-se que a concentração de particulados mostrou-se como o elemento de maior criticidade nas medições realizadas, sugerindo-se que, para esse tipo de atividade realizada nos eventos analisados, a renovação de ar da sala deve ser projetada prioritariamente em função deste parâmetro, ao invés da concentração de CO₂, menos crítica para este caso.

Verifica-se também, pelo formato das curvas, uma correlação entre a variação dos materiais particulados dos diferentes tamanhos analisados (PM_{10} e $PM_{2,5}$), tanto no interior do ambiente como na área externa. Em relação à concentração de $PM_{2,5}$, contudo, verifica-se nos Gráficos 5.19, 5.20 e 5.21, que, apesar de apresentar um formato de variação similar à do PM_{10} , ela manteve-se dentro do limite recomendado pela Resolução N° 491 (CONAMA, 2018), como padrão final (PF), alinhada com a Organização Mundial de Saúde (WHO, 2005), de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, no interior do ambiente. Isso ocorreu mesmo nos momentos em que os valores estiveram fora desse limite na área externa, no 2° Dia do evento de 2017, demonstrando uma boa atuação do sistema de filtragem de ar.

Gráfico 5.19: Variação da concentração de $PM_{2,5}$ durante a edição de 2016 da Oficina de Rolimã (baseado em dados de medições de Fakhoury (2017)).

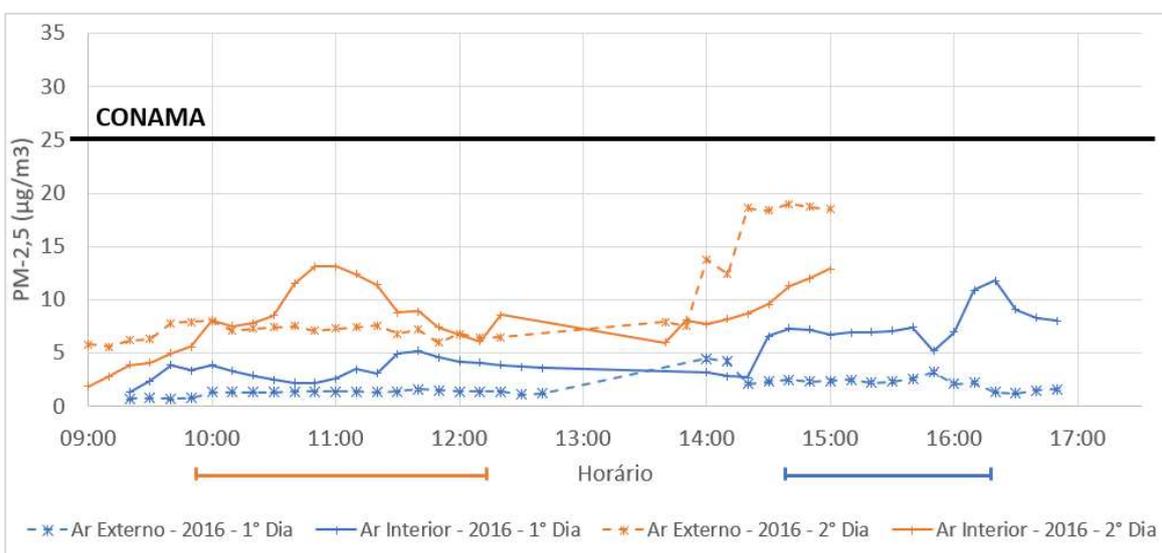


Gráfico 5.20: Variação da concentração de $PM_{2,5}$ durante a edição de 2017 da Oficina de Rolimã (baseado em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).

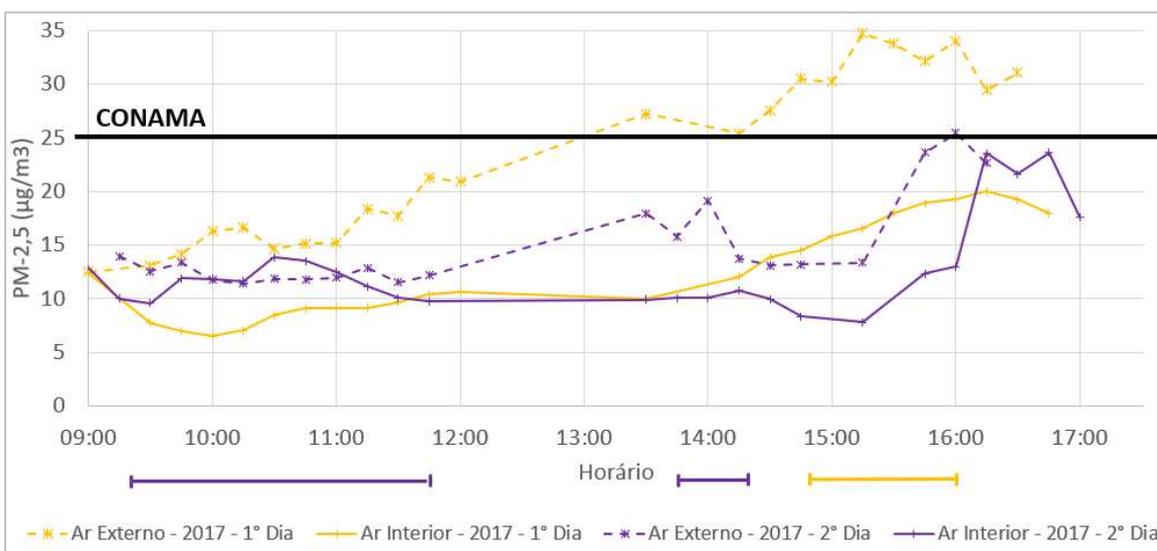
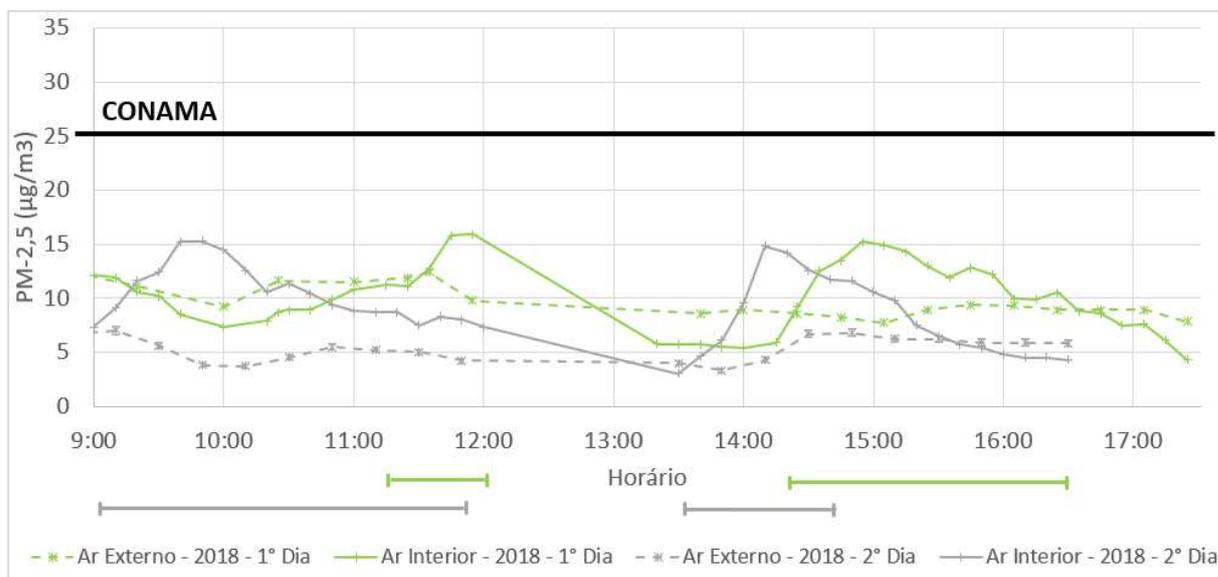


Gráfico 5.21: Variação da concentração de PM_{2,5} durante a edição de 2018 da Oficina de Rolimã.

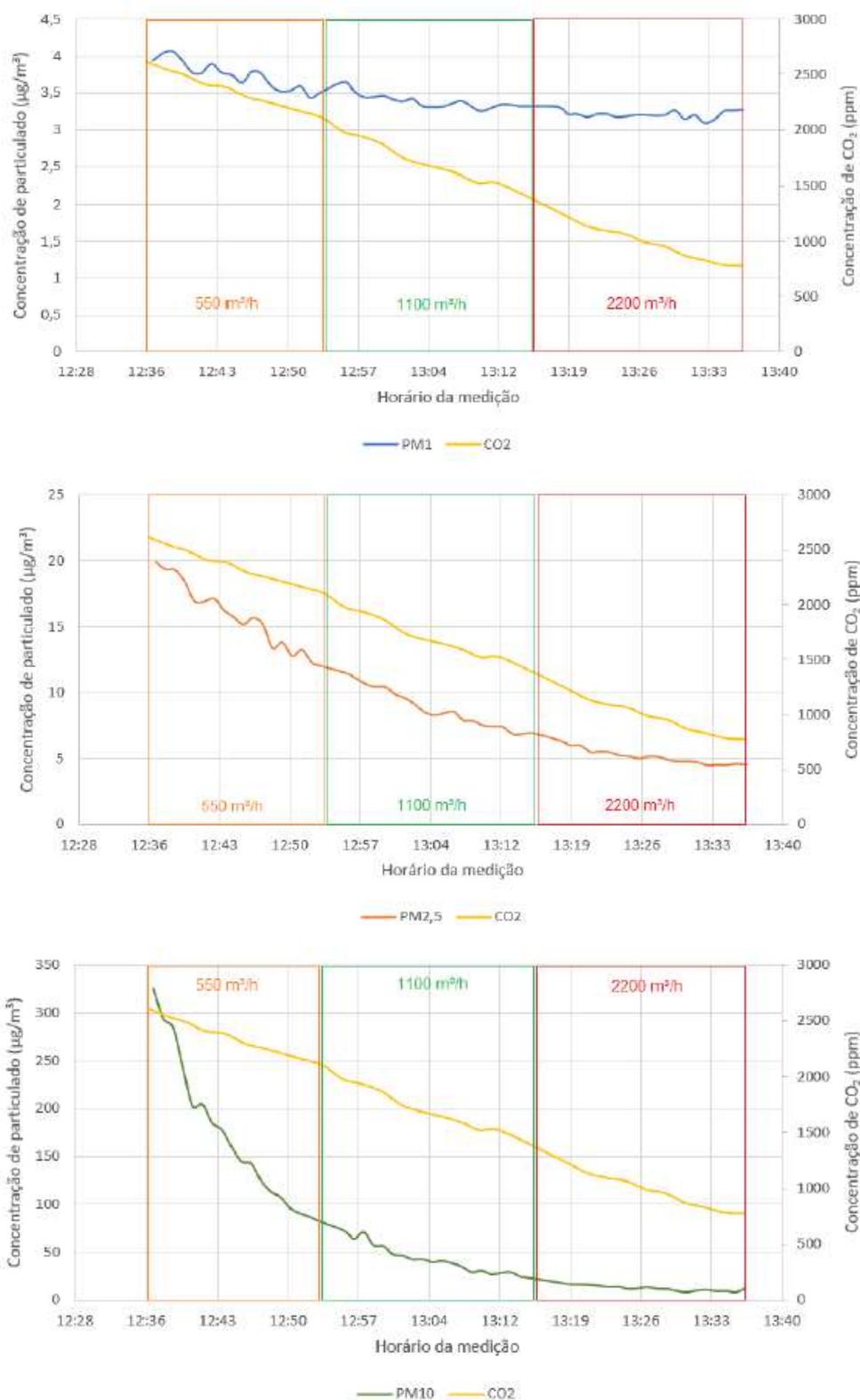


Visualiza-se, ainda, para a concentração de materiais particulados, que a inclinação da curva de decaimento é proporcional ao aumento da taxa específica de renovação de ar, com uma visível correlação negativa entre estes parâmetros, conforme seria esperado pelo efeito de diluição promovido pelo ar externo. A taxa de decaimento no ambiente, bem como a vazão de renovação de ar requerida para CO₂, PM₁₀ e PM_{2,5} foram diferentes entre si, indicando que os poluentes possuem taxas de diluição distintas.

Para estudo mais detalhado deste fato, foi desenvolvido um ensaio experimental específico, realizado durante o horário de almoço dos dois dias da edição de 2019 da Oficina de Rolimã, conforme detalhado no Item 4.4.1.2. Foram mantidos níveis elevados de concentração de contaminantes no interior da Sala A2 no final do período da manhã, visando a análise do seu decaimento durante o período do almoço, quando os ocupantes saíram da sala em direção ao refeitório. A vazão de ar sofreu um aumento progressivo a cada 20 minutos, variando-se de 1 caixa para 4 caixas de renovação ligadas, conforme apresentado na Figura 4.10.

Os resultados obtidos para as curvas de decaimento dos materiais particulados, em relação ao decaimento de concentração do CO₂, para os tamanhos de particulados PM₁, PM_{2,5} e PM₁₀, são apresentados no Gráfico 5.22, elaborado por Dante e Bisordi (2020) e reproduzido abaixo. Pode-se visualizar que, quanto menor o tamanho do material particulado, mais lento tende a ser o seu decaimento no ambiente, para uma condição similar de vazão de ar de renovação.

Gráfico 5.22: Curvas de decaimento dos materiais particulados em comparação com o CO₂ durante o período do almoço da Oficina de Rolimã de 2019 (DANTE & BISORDI, 2020).



5.1.2. Oficinas de Brinquedos

As Oficinas de Brinquedos tiveram os parâmetros de qualidade do ar monitorados durante os eventos realizados entre os anos de 2016 e 2019. No presente trabalho foram realizadas as medições dos dados referentes ao ano de 2019. Assim como nas Oficinas de Carinhos de Rolimã, as edições a partir de 2020 não puderam ser efetuadas, em função das limitações impostas pela pandemia.

Os dados apresentados das edições anteriores, de 2016 a 2018, foram obtidos em trabalhos anteriores de membros do LEQAI, disponíveis em Fakhoury (2017), Dal Pogeto et al. (2018) e Guilhotti (2021). Todas as medições das diferentes edições do evento ocorreram no ambiente da Sala de Aula A2 do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP.

5.1.2.1. Temperatura e umidade relativa

Os valores de temperatura de bulbo seco monitorados durante as edições das Oficinas de Brinquedos são apresentados nos Gráficos 5.23 e 5.24, com dados de dois anos cada. Já os valores de umidade relativa são apresentados nos Gráficos 5.25 e 5.26.

Gráfico 5.23: Variação da temperatura de bulbo seco durante as edições de 2016 e 2017 da Oficina de Brinquedos (curvas de 2016 baseadas em dados de medições de Fakhoury (2017) e curvas de 2017 baseadas em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).

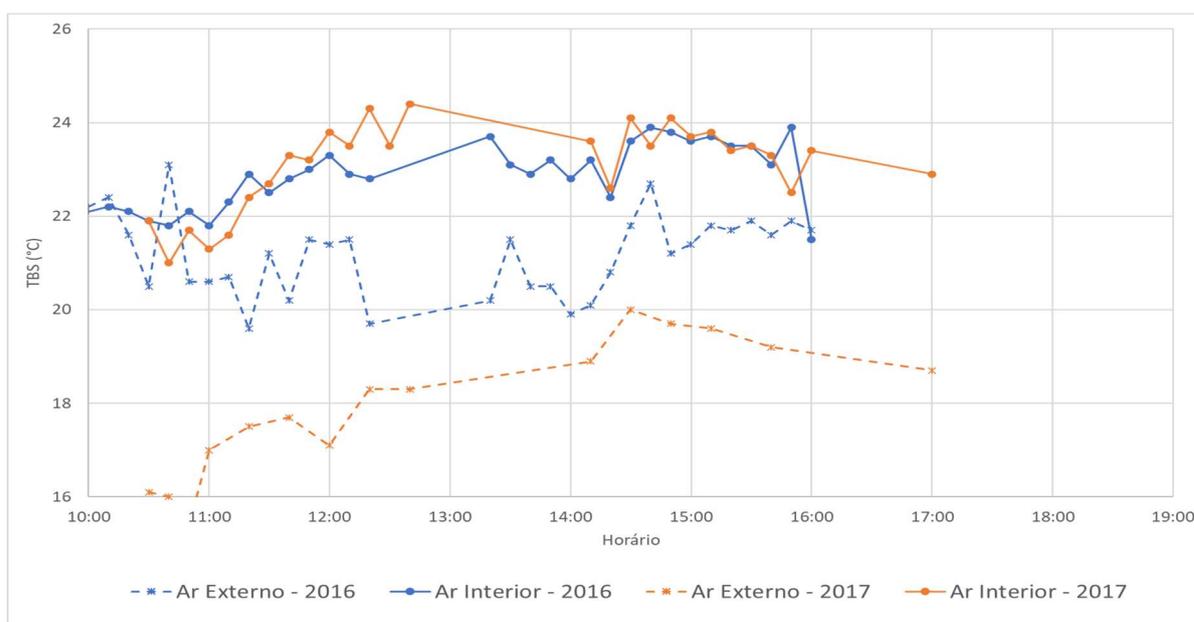
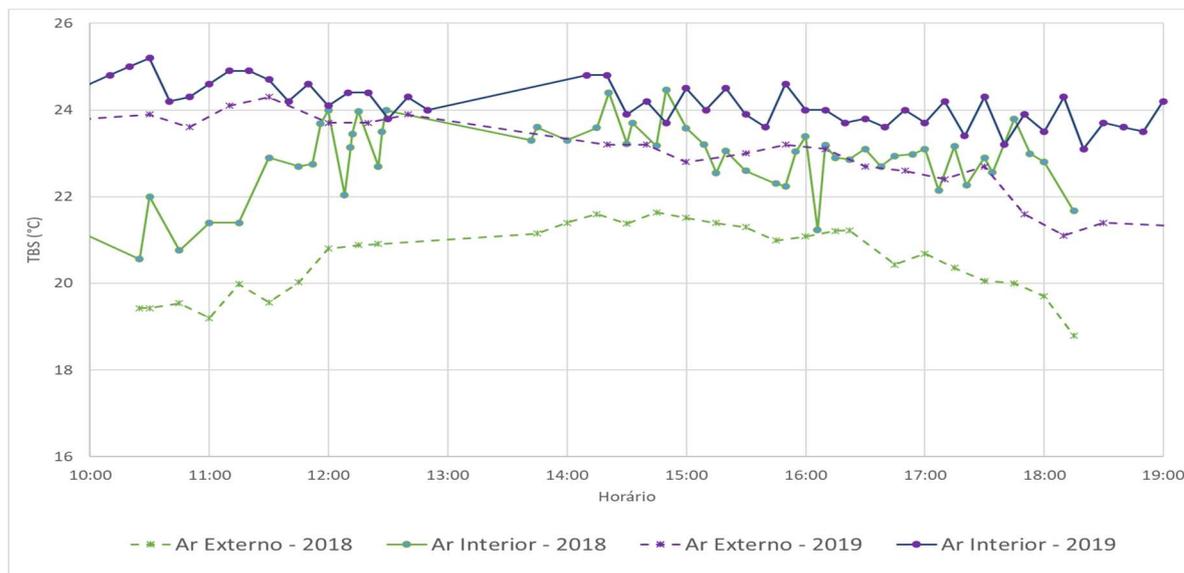


Gráfico 5.24: Variação da temperatura de bulbo seco durante as edições de 2018 e 2019 da Oficina de Brinquedos (curvas de 2018 baseadas em dados de medições de Guilhotti (2021)).



Assim como verificado na Oficina de Rolimã (Item 5.1.1.1), pode-se visualizar nos gráficos a tendência de as curvas das grandezas medidas no interior da sala (linhas grossas) acompanhar o formato da variação do ar exterior (linhas tracejadas), apontando para uma correlação entre os parâmetros psicrométricos no interior e exterior do ambiente. Conforme pode ser visualizado nos Gráficos 5.23 e 5.24, a temperatura no interior da sala foi mantida durante os eventos dentro de condições de conforto, entre 22 e 25°C, indicando um controle adequado do “set-point” interno, realizado pelo sistema de condicionamento de ar.

Gráfico 5.25: Variação da umidade relativa durante as edições de 2016 e 2017 da Oficina de Brinquedos (curvas de 2016 baseadas em dados de medições de Fakhoury (2017) e curvas de 2017 baseadas em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).

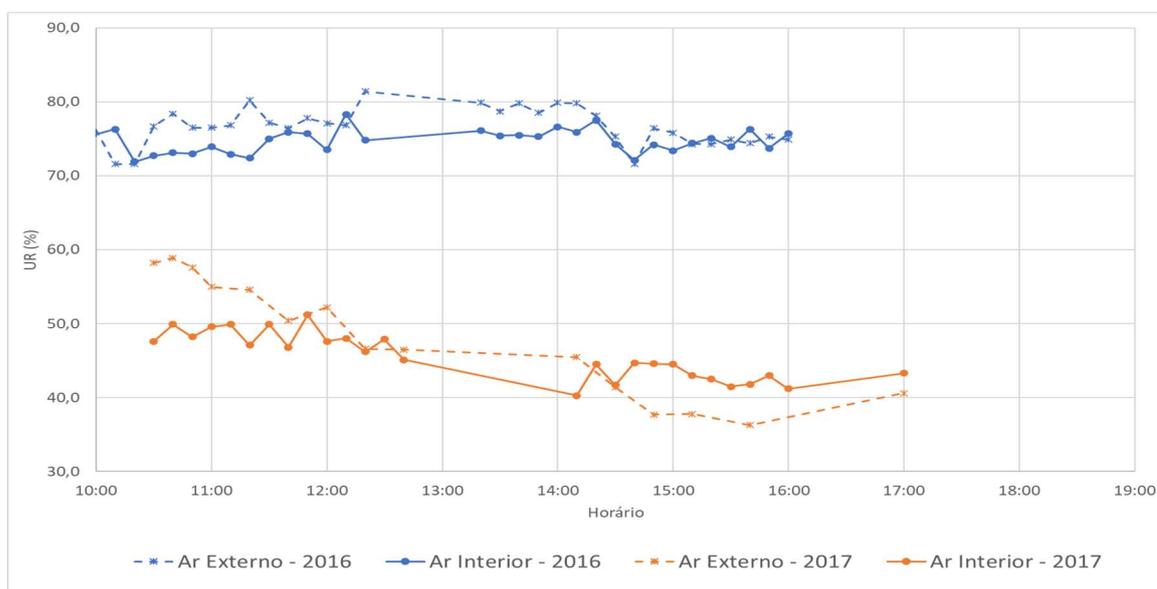
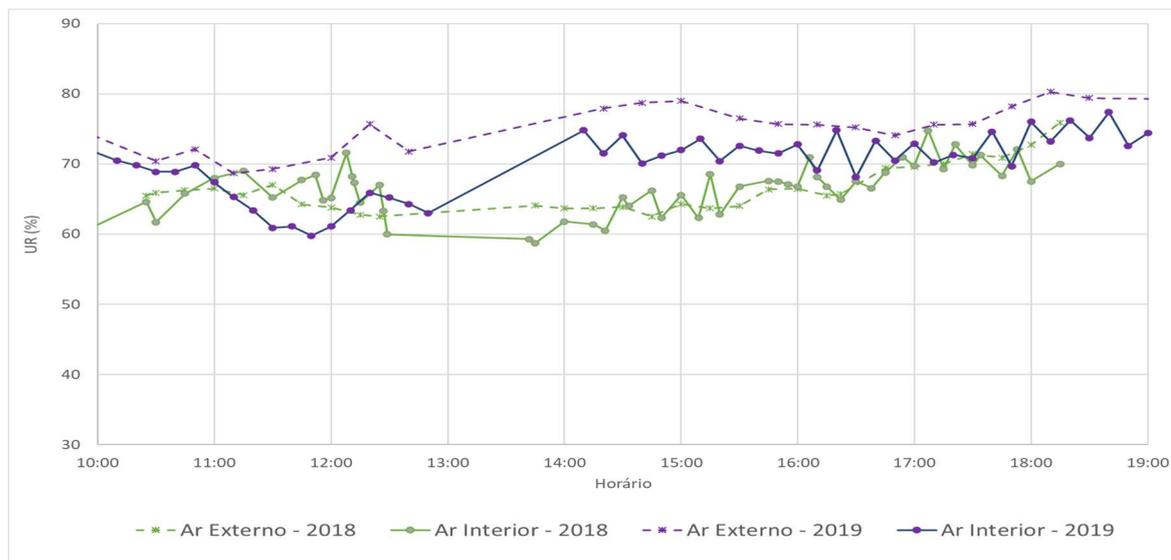


Gráfico 5.26: Variação da umidade relativa durante as edições de 2018 e 2019 da Oficina de Brinquedos (curvas de 2018 baseadas em dados de medições de Guilhotti (2021)).



Em relação à umidade relativa, por outro lado, os valores obtidos nos eventos, apresentados nos Gráficos 5.25 e 5.26, estiveram, durante as edições de 2016 e 2019, acima da faixa recomendada para o verão por ANVISA (2003) e NBR 16401 (ABNT, 2008), de 40% a 65%, conforme detalhado no Item 3.2, atingindo-se valores da ordem de 80% no ambiente interno. A obtenção destes pontos fora do recomendado para a umidade é compreensível, dado não haver um sistema de controle de umidade na sala, sendo apenas a temperatura controlada diretamente.

5.1.2.2. Vazão de ar externo de renovação

As variações da vazão de ar de renovação por pessoa empregada ao longo dos eventos podem ser visualizadas nos Gráficos 5.27 e 5.28, onde pode-se verificar que, durante a maior parte do período da tarde das edições, a taxa de renovação manteve-se um pouco acima do valor mínimo de vazão estipulado pela RE-09 (ANVISA, 2003), de 27 m³/h/pessoa.

No período da manhã, por outro lado, em parte do tempo, a taxa manteve-se abaixo deste valor. As interrupções nos gráficos de cada edição referem-se à pausa para o horário do almoço, na qual os alunos saíram da sala em direção ao refeitório, retornando posteriormente no período da tarde.

Gráfico 5.27: Variação da vazão de ar por ocupante durante as edições de 2016 e 2017 da Oficina de Brinquedos (curva de 2016 baseada em dados de medições de Fakhoury (2017) e curva de 2017 baseada em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).

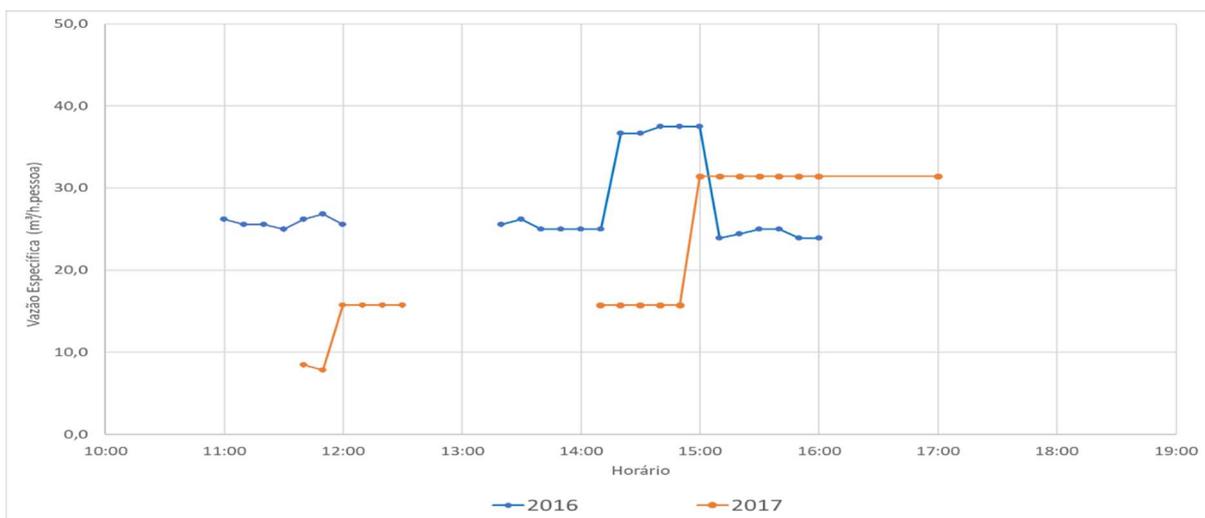
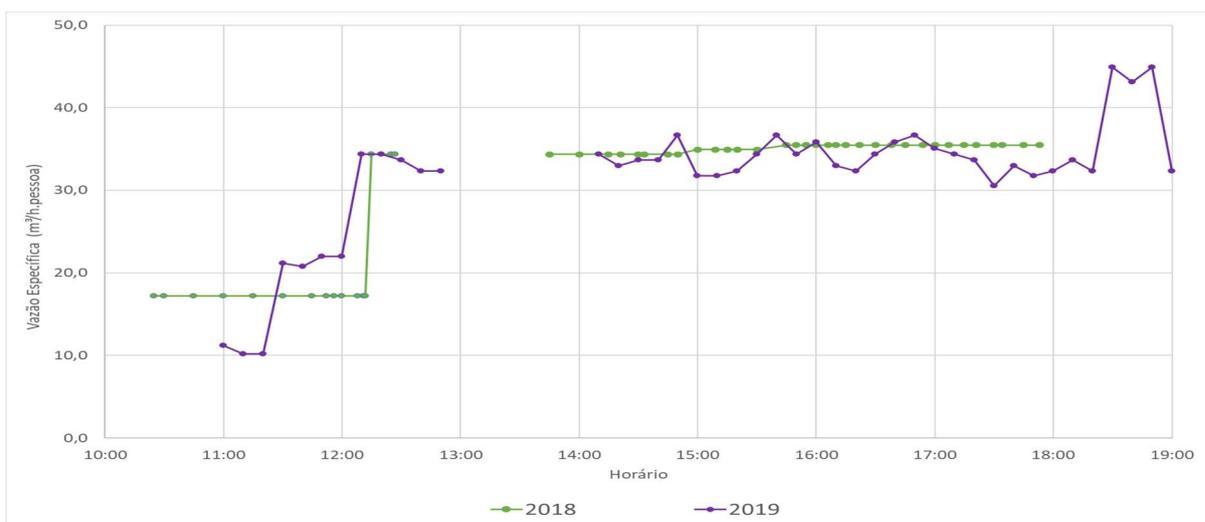


Gráfico 5.28: Variação da vazão de ar por ocupante durante as edições de 2018 e 2019 da Oficina de Brinquedos (curva de 2018 baseada em dados de medições de Guilhotti (2021)).



5.1.2.3. Concentração de CO₂

As variações da concentração de dióxido de carbono (CO₂) no interior da sala e no ar externo, durante as diferentes edições do evento, podem ser visualizadas nos Gráficos 5.29 e 5.30. De uma forma geral, na parte da manhã, com as taxas de renovação mantidas baixas, os níveis de concentração de CO₂ no ar interior da sala A2 tenderam a atingir valores elevados. Esses valores apresentaram redução apenas depois do início do período de almoço, com a saída dos ocupantes do interior da sala.

Gráfico 5.29: Variação da concentração de CO₂ durante as edições de 2016 e 2017 Oficina de Brinquedos (curvas de 2016 baseadas em dados de medições de Fakhoury (2017) e curvas de 2017 baseadas em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).

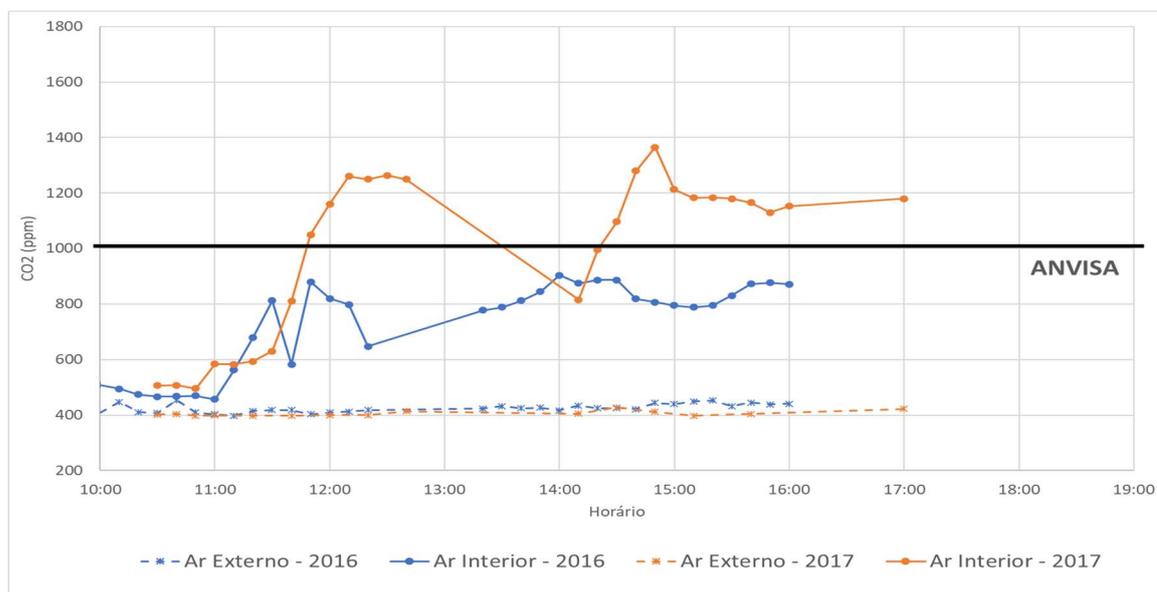
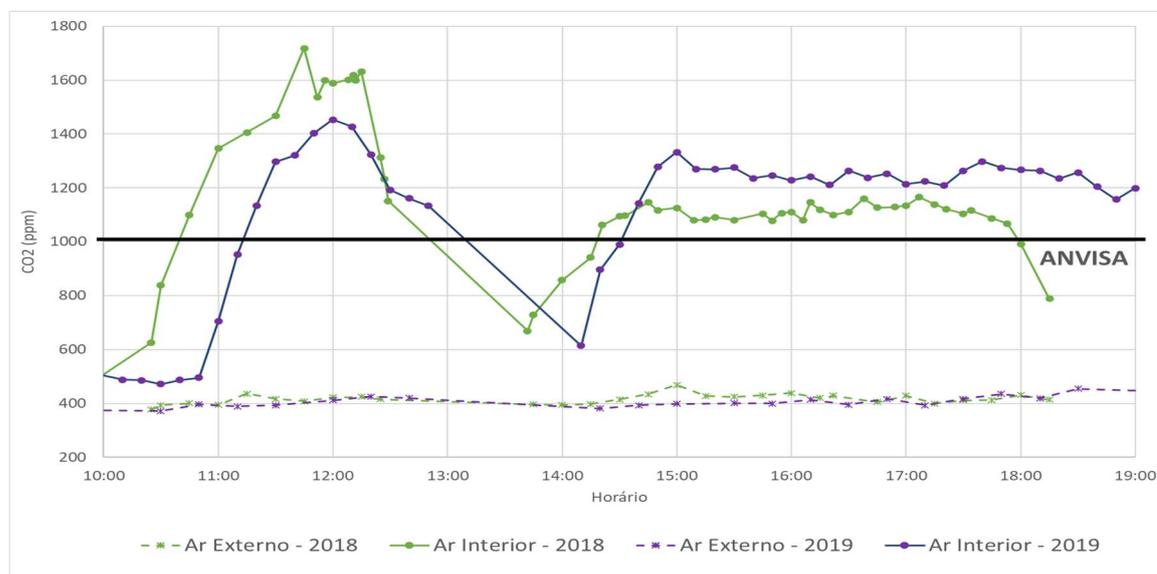


Gráfico 5.30: Variação da concentração de CO₂ durante as edições de 2018 e 2019 Oficina de Brinquedos (curvas de 2018 baseadas em dados de medições de Guilhotti (2021)).



Durante o período da tarde, por outro lado, apesar da taxa de renovação de ar ter sido mantida, em geral, acima do valor estipulado pela Resolução RE-09 (ANVISA, 2003), como indicado nos Gráficos 5.27 e 5.28, os níveis de CO₂ interno do ambiente se mantiveram constantemente acima do nível recomendado por esta mesma Resolução, se estabilizando em níveis próximos dos 1.200 ppm. Isso indica que, para o caso das Oficinas de Brinquedos, a taxa de renovação de ar estipulada por ANVISA (2003) não foi suficiente para manter as condições de CO₂ no interior do ambiente dentro dos níveis recomendados.

As concentrações no ar externo, por sua vez, representadas pelas linhas tracejadas nos Gráficos 5.29 e 5.30, se mantiveram praticamente estáveis durante todas as edições do evento, com valores ao redor de 400 ppm. Isso indica que as variações de concentração no ar interior tiveram pouca relação com as condições externas, sendo influenciadas primordialmente pelos ocupantes e pelas atividades desenvolvidas por eles no interior da sala.

5.1.2.4. Concentração de particulados (PMs)

Os valores obtidos nas medições para as concentrações de materiais particulados do tipo PM₁₀, monitorados no interior do ambiente e na área externa, encontram-se apresentados nos Gráficos 5.31 e 5.32. Já os valores referentes às concentrações de PM_{2,5} são apresentados nos Gráficos 5.33 e 5.34.

São apresentados linhas de base horizontais nos respectivos gráficos com as recomendações das referências apresentadas no Item 3.4.1. As barras abaixo das curvas indicam períodos em que foram realizados processos de fabricação.

Gráfico 5.31: Concentração de PM₁₀ durante as edições de 2016 e 2017 da Oficina de Brinquedos (curvas de 2016 baseadas em dados de medições de Fakhoury (2017) e curvas de 2017 baseadas em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).

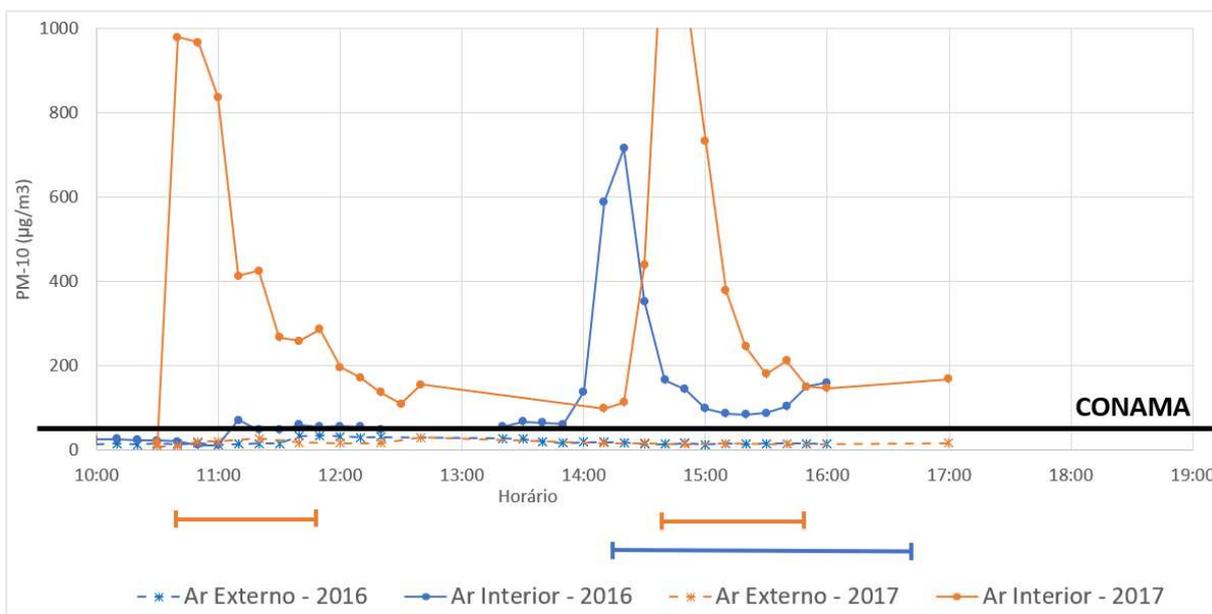
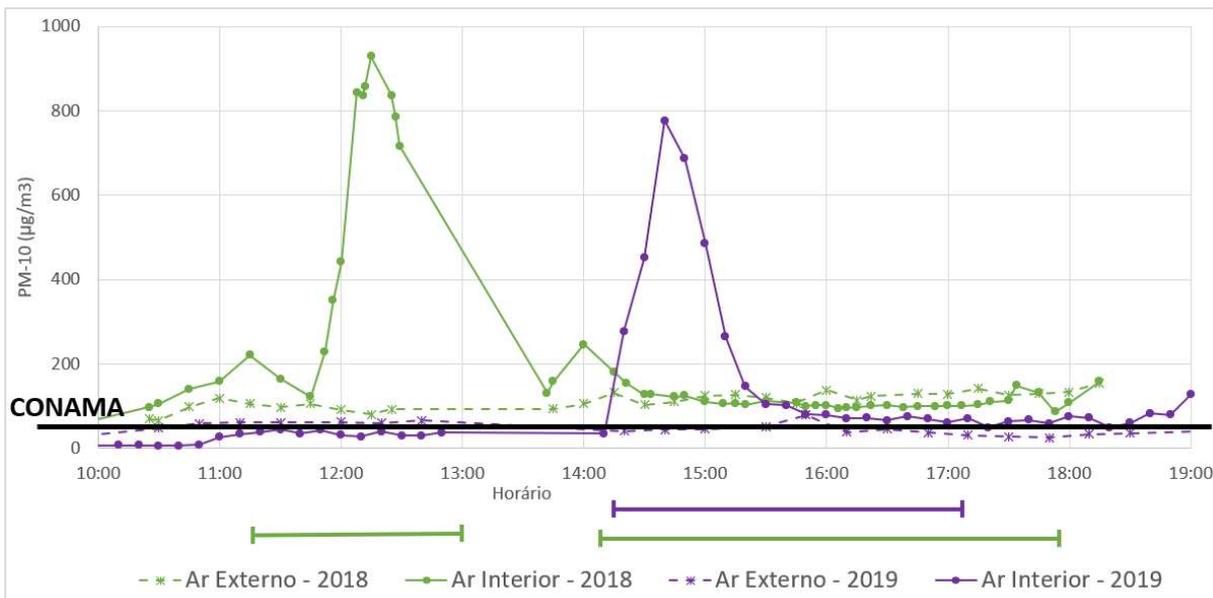


Gráfico 5.32: Concentração de PM₁₀ durante as edições de 2018 e 2019 da Oficina de Brinquedos (curvas de 2018 baseadas em dados de medições de Guilhotti (2021)).



Analisando as curvas da concentração de materiais particulados, visualiza-se, nos Gráficos 5.31 e 5.32, que os aumentos de concentração de PM₁₀ no interior do ambiente ocorreram nos períodos em que foram iniciadas atividades de fabricação por parte dos alunos, atingindo-se valores acima de 1.000 ppm (20 vezes superior ao recomendado por CONAMA (2018)). Isso indica que a variação está correlacionada principalmente ao tipo de atividade realizada pelos ocupantes do ambiente, com pouca relação com a concentração de PM₁₀ no ambiente externo, que se manteve estável ao longo do dia, nas diferentes edições do evento.

Gráfico 5.33: Concentração de PM_{2,5} durante as edições de 2016 e 2017 da Oficina de Brinquedos (curvas de 2016 baseadas em dados de medições de Fakhoury (2017) e curvas de 2017 baseadas em dados de medições de Dal Pogeto (2018)).

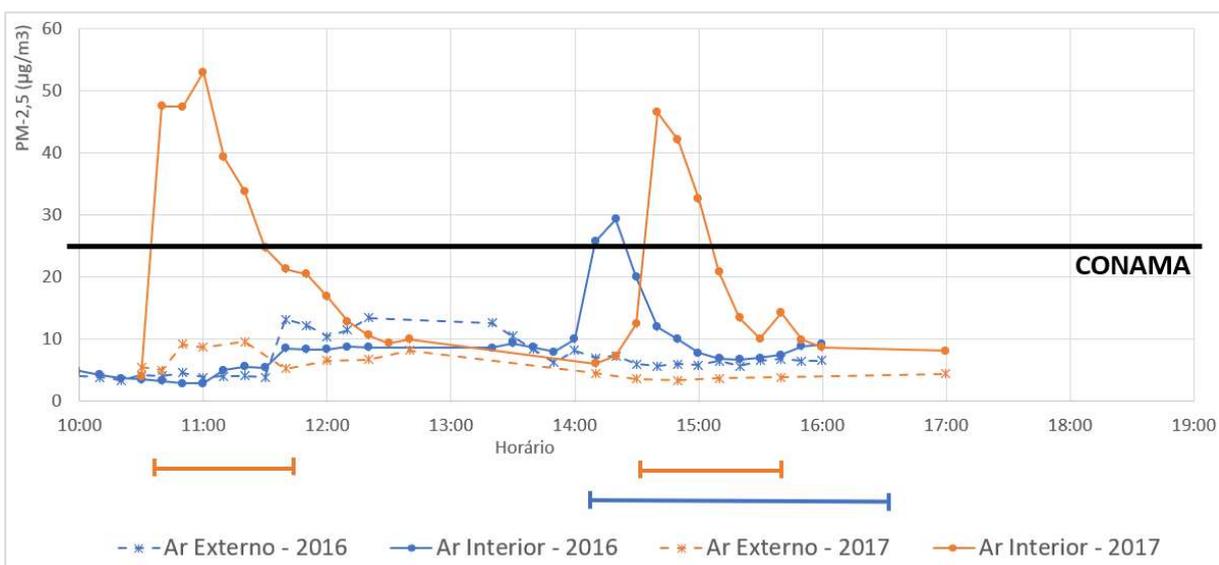
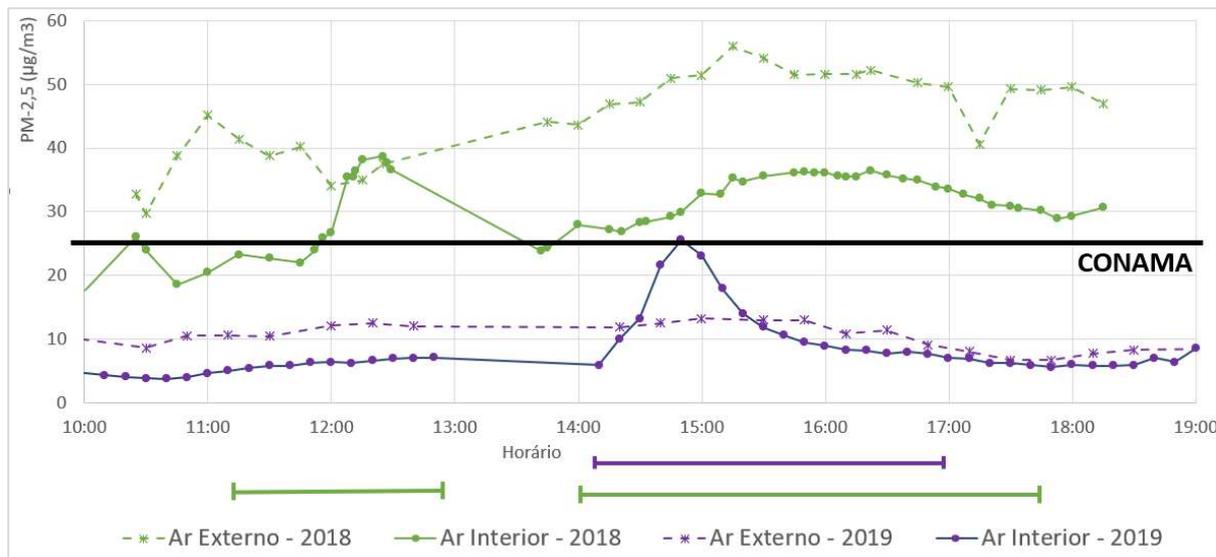


Gráfico 5.34: Concentração de PM_{2,5} durante as edições de 2018 e 2019 da Oficina de Brinquedos (curvas de 2018 baseadas em dados de medições de Guilhotti (2021)).



Já em relação ao PM_{2,5}, percebe-se, nos Gráfico 5.33 e 5.34, uma relação entre o aumento da concentração de material particulado e a atividade dos ocupantes. Principalmente em 2017, porém, já se verifica uma tendência de aproximação de comportamento dos particulados nos ambientes interno e externo. Isso pode ser explicado pela menor eficiência de filtragem das caixas de renovação (G4+M5) para os particulados finos e pelo tipo de particulado gerado nas atividades de fabricação, com madeira, realizadas na sala, que tendem a produzir material de maiores tamanhos.

Uma situação fora do padrão ocorreu na edição do ano de 2018, em que se verificou uma alta concentração de PM_{2,5} no ar externo. Esse fato foi relacionado a um processo de varrição pneumática, com soprador de folhas, que ocorria na área externa durante este evento. Esse fato motivou a realização de um experimento específico, apresentado no Item 5.2.

5.1.3. Estudo de correlações

Para realizar uma análise quantitativa do grau de correlação entre os parâmetros e confirmar as relações verificadas entre eles através das curvas, apresentamos, na Tabela 5.1 e na Tabela 5.2, duas matrizes de correlação entre parâmetros, conforme proposto em Chernick e Friis (2003). Foi utilizado como critério de avaliação o coeficiente de correlação linear de Pearson, calculado como a divisão da covariância pelo desvio padrão das variáveis, conforme definido no Item 4.7. Este coeficiente oscila entre -1 (correlação linear negativa perfeita) e +1 (correlação linear positiva perfeita), conforme detalhado na Tabela 4.17.

Tabela 5.1: Matriz de correlação linear de Pearson entre os parâmetros psicrométricos.

Correlações entre Parâmetros Termohigrométricos				
R	TBS Ar Interior	TBS Ar Externo	UR Ar Interior	UR Ar Externo
TBS Ar Interior	1	0.72	-0.26	-0.19
TBS Ar Externo	0.72	1	-0.19	-0.18
UR Ar Interior	-0.26	-0.19	1	0.88
UR Ar Externo	-0.19	-0.18	0.88	1

Tabela 5.2: Matriz de correlação linear de Pearson entre os parâmetros de qualidade do ar.

Correlações entre Parâmetros da QAI			
R	CO2 Ar Interior	PM10 Ar Interior	PM2,5 Ar Interior
CO2 Ar Interior	1	0.44	0.44
PM10 Ar Interior	0.44	1	0.61
PM2,5 Ar Interior	0.44	0.61	1

Na Tabela 5.3, são apresentados coeficientes de correlação linear de Pearson entre os níveis de concentração de CO₂ e de materiais particulados no ambiente, o número de ocupantes e a vazão de renovação de ar. Para a elaboração da matriz “a” foram separados os dados obtidos em períodos sem renovação de ar na sala, de forma a se efetuar a relação entre a concentração dos elementos no ambiente interno e o número de ocupantes, sem o efeito do ar externo. Já para a elaboração da matriz “b” foram selecionados dados de medições obtidos em períodos de decaimento de concentrações dos elementos, para permitir a avaliação da relação dessa queda dos níveis no ambiente interno com a vazão específica de renovação.

Tabela 5.3: Matriz de correlação linear de Pearson entre os parâmetros de qualidade do ar.

(a) Correlação com Ocupantes, sem Renovação de Ar		(b) Correlação com taxa de vazão de ar externo, para períodos de decaimento de contaminantes		
R	Nº de Ocupantes	R	Parâmetro Ar Externo	Taxa de Renovação
CO2 Ar Interior	0.71	CO2 Ar Interior	0	-0.47
PM10 Ar Interior	0.23	PM10 Ar Interior	0.23	-0.29
PM2,5 Ar Interior	0.26	PM2,5 Ar Interior	0.73	-0.27

Em relação aos parâmetros termo-higrométricos, a Tabela 5.1 mostra uma forte correlação positiva entre a umidade relativa no interior do ambiente com a do ambiente externo, o que indica uma grande influência das condições climáticas externas locais no comportamento desse parâmetro no ambiente interno. Esse fato pode ser explicado pela falta de controle de umidade no sistema de ar condicionado da sala, permitindo sua oscilação ao longo do dia. Na maioria dos períodos dos eventos, contudo, a umidade e a temperatura na sala de aula foram mantidas dentro das condições de conforto.

Em relação à concentração de dióxido de carbono (CO_2), vemos na Tabela 5.2 uma correlação entre sua concentração no ar interno e externo extremamente baixa, indicando que as variações do nível de CO_2 dentro da sala, ao longo dos eventos, foram resultado de outros fatores. Este fato já havia sido sugerido nos Gráficos 5.13, 5.14 e 5.15 e nos Gráficos 5.29 e 5.30, pois as concentrações no ar externo não tiveram grandes oscilações durante as medições, mantendo valores entre 350 e 450 ppm, enquanto no interior da sala alcançou-se valores de até 1800 ppm.

Por outro lado, na Tabela 5.3, podem ser verificadas quais são as variáveis que influenciaram significativamente a concentração de CO_2 no ar interno, a saber: o número de ocupantes (correlação positiva) e a vazão específica do ar externo (correlação negativa).

Quanto aos níveis de materiais particulados, pode-se observar na Tabela 5.3 que a correlação entre os teores de $\text{PM}_{2,5}$ no interior e no ar externo foi muito superior à mesma correlação calculada para o PM_{10} , apesar de ambos serem positivos. Este resultado está relacionado à maior capacidade de retenção do sistema de filtragem de ar para partículas de maior diâmetro, promovendo como consequência uma maior separação entre os ambientes interno e externo, quanto maior o tamanho das partículas. Além disso, o tipo de fabricação realizada ao longo dos eventos monitorados (lixamento, serragem etc.) tende a produzir particulados de maiores diâmetros.

A utilização de vazões de ar externo específicas próximas ao exigido pela regulamentação brasileira ANVISA (2003), de $27 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{pessoa})$ não foi suficiente para conter o aumento da concentração de PM_{10} dentro da sala. Esses resultados demonstram uma maior criticidade desse parâmetro em comparação aos demais para a obtenção de uma qualidade de ar interna adequada nos eventos.

Portanto, neste estudo de caso, o PM_{10} é o parâmetro que exige maior atenção do projetista do sistema de climatização no dimensionamento do sistema de renovação do ar ambiente. Os dados

apresentados na Tabela 5.3 corroboram essa recomendação. Pode-se visualizar que o decaimento na concentração de materiais particulados apresentou menor sensibilidade a um aumento na vazão específica de ar externo em relação ao CO₂ (correlação negativa de -0,29 para PM₁₀ em comparação a -0,47 para CO₂).

A partir da análise estatística das medições obtidas para os parâmetros monitorizados no ar interior e exterior ao longo dos eventos, verificou-se a existência de diferentes graus de correlação entre os parâmetros envolvidos no dimensionamento do sistema de renovação de ar da instalação. Nesse sentido, o estudo de correlações pode ser de grande valia para o projetista de sistemas de climatização, ao verificar-se o parâmetro mais crítico para uma determinada aplicação, otimizando assim a qualidade do ar interno e o consumo de energia das edificações.

5.2. Medições no Evento com Varredor Pneumático

No experimento desenvolvido para análise dos efeitos do varredor pneumático sobre a QAI, cujos procedimentos foram detalhados no Item 4.4.2, foram efetuadas medições de parâmetros relacionados à qualidade do ar ao longo do período de uma manhã, com monitoramento das atividades e medições no ambiente interno e no ar exterior. Os parâmetros monitorados foram concentrações de CO₂, de materiais particulados (PM_{0,5}, PM₁, PM_{2,5} e PM₁₀) e de agentes microbiológicos (fungos viáveis). Foram medidas, ainda, as condições termo-higrométricas (temperatura e umidade relativa) e meteorológicas (direção e velocidade do vento).

5.2.1. Condições de referência

No experimento estudado, as medições foram iniciadas às 07:45. Deste horário de início até as 08:20, foram realizadas medições das condições referência do ar interior e do ar externo, referentes às condições de temperatura, umidade, concentração de CO₂, particulados e agentes microbiológicos, para a sala ainda sem nenhum equipamento acionado.

Às 08:20 foram acionadas duas caixas de ventilação de ar externo, totalizando a vazão de renovação de ar de 1.100 m³/h na sala. Deste horário até as 08:55, foi realizado mais um conjunto de medições de referência nos ambientes interno e externo, para sala com renovação de ar ativada e ainda sem o início do processo de varrição. Os valores médios obtidos nestas medições das condições de referência (“baseline”) são dados na Tabela 5.4 e na Tabela 5.5.

Tabela 5.4: Condições médias de referência dos parâmetros termo-higrométricos e de concentração de CO₂ e materiais particulados na sala.

Local	Nº de Medições	PM _{0,5} (µg/m ³)	PM ₁ (µg/m ³)	PM _{2,5} (µg/m ³)	CO ₂ (ppm)	TBS (°C)	UR (%)
Interior da Sala (sem Renovação)	9	2,7	3,6	6,3	425	20,3	67%
Interior da Sala (com Renovação)	4	2,0	2,8	5,3	490	20,2	69%
Ar Externo	11	1,5	2,4	7,3	364	18,4	73%

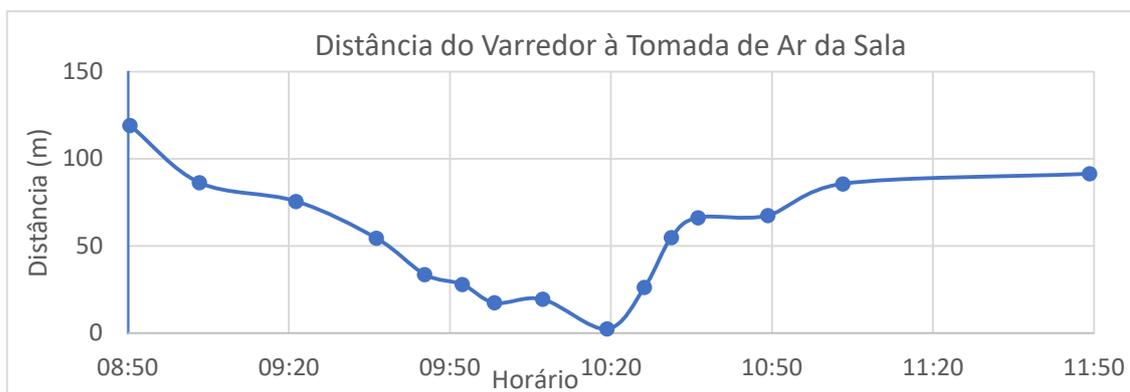
Tabela 5.5: Condições médias de referência dos agentes microbiológicos na sala.

Agentes Microbiológicos (UFC/m ³)			
Local	Interior da Sala (sem renovação)	Interior da Sala (com renovação)	Ar Externo
Nº de Medições	2	2	2
<i>Cladosporium</i>	123	516	661
<i>Penicillium</i>	11	38	0
<i>Rhizopus</i>	0	0	3,5
<i>Fusarium</i>	7	0	0
<i>Aspergillus</i>	0	0	0
<i>Phoma</i>	0	0	0
Não esporulado	201	46	89
Fungos Viáveis - Total:	343	601	753

5.2.2. Posição do varredor pneumático

O processo de varrição com soprador pneumático teve início às 08:49 do dia do experimento, tendo sido iniciada em um ponto do edifício distante da tomada de ar da sala, se aproximando progressivamente. As 10:20 foi o horário em que a varrição esteve mais próxima do ambiente estudado, a apenas 2 metros da tomada de ar de renovação da sala. Após este horário, o varredor voltou a se distanciar progressivamente do ambiente. A progressão das distâncias de varrição, em relação ao ponto de tomada de ar da sala, pode ser visualizada no Gráfico 5.35.

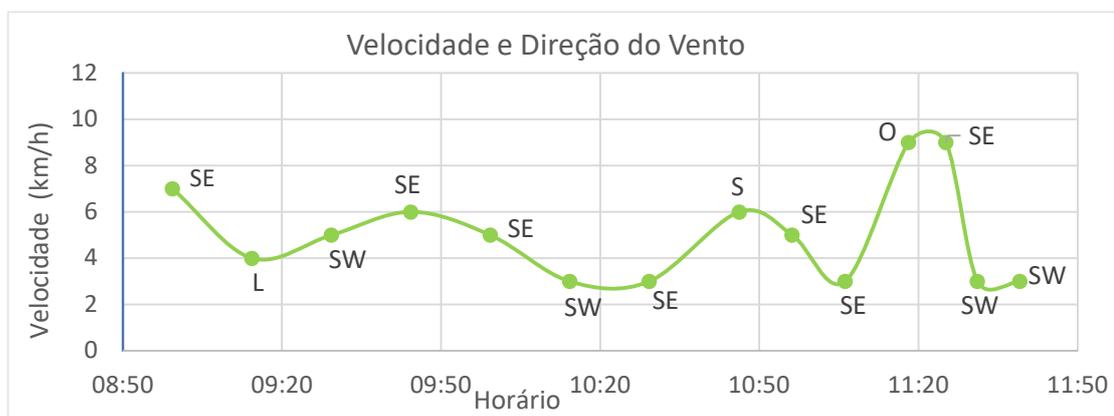
Gráfico 5.35: Distância do varredor à tomada de ar da sala ao longo do experimento.



5.2.3. Condições meteorológicas

As condições de velocidade e direção do vento no local das medições foram monitoradas ao longo do desenvolvimento do experimento, para verificação da possível influência deste fator sobre os níveis dos contaminantes analisados. Os dados eólicos medidos são apresentados no Gráfico 5.36, no qual a velocidade do vento variou entre 2 e 10 km/h ao longo da manhã, com as direções principais concentradas, em sua maioria, entre sudeste e sudoeste.

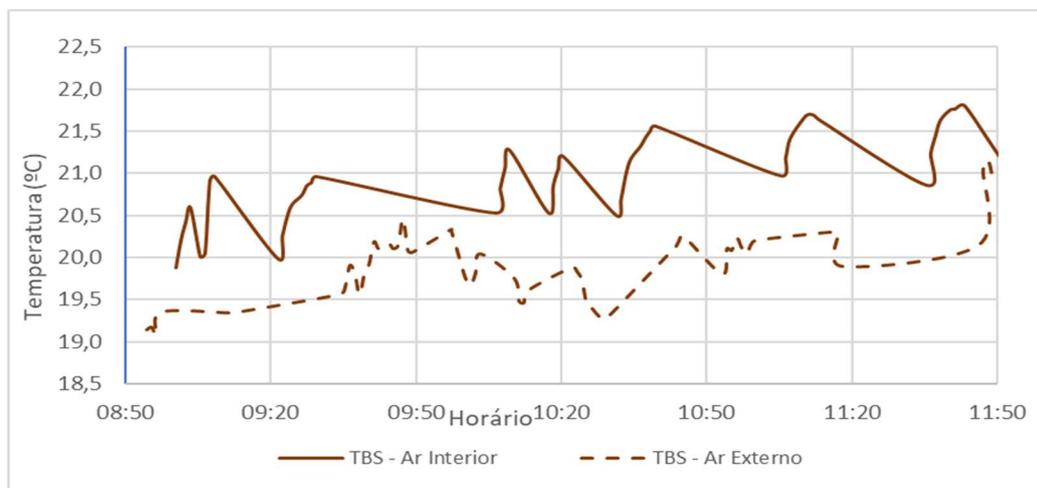
Gráfico 5.36: Velocidade e direção do vento ao longo do experimento.



5.2.4. Temperatura e umidade relativa

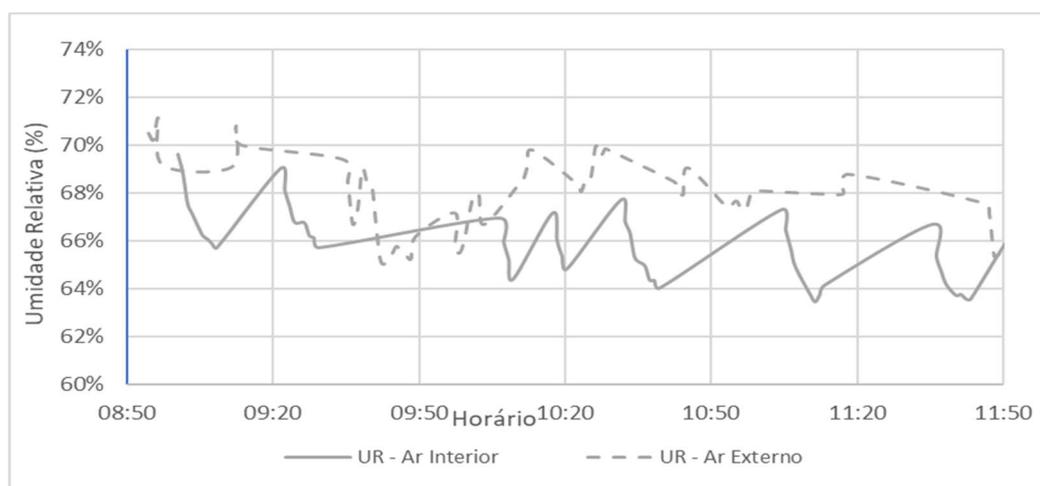
Os valores das medições realizadas para a temperatura de bulbo seco (TBS) no interior da sala e no ar externo ao longo do experimento são apresentados no Gráfico 5.37. Pode-se visualizar que as temperaturas na área externa se mantiveram em geral na faixa entre 19 e 21°C, enquanto no interior do ambiente a variação foi entre 20 e 22°C. Este intervalo corresponde à faixa de variação recomendada pela Resolução RE-09 (ANVISA, 2003) para inverno.

Gráfico 5.37: Variação da temperatura de bulbo seco ao longo do experimento.



Os valores das medições de umidade relativa, por sua vez, são apresentados no Gráfico 5.38. Pode-se visualizar que a umidade relativa, tanto no ar interior como no ambiente externo, teve pouca variação ao longo do ensaio, tendo se mantido na faixa entre 64% e 70%. Estes valores encontram-se levemente acima do máximo recomendado por ANVISA (2003), de 65%, e pela NBR 16401(ABNT, 2008), de 60%, para condições de inverno.

Gráfico 5.38: Variação da umidade relativa ao longo do experimento.

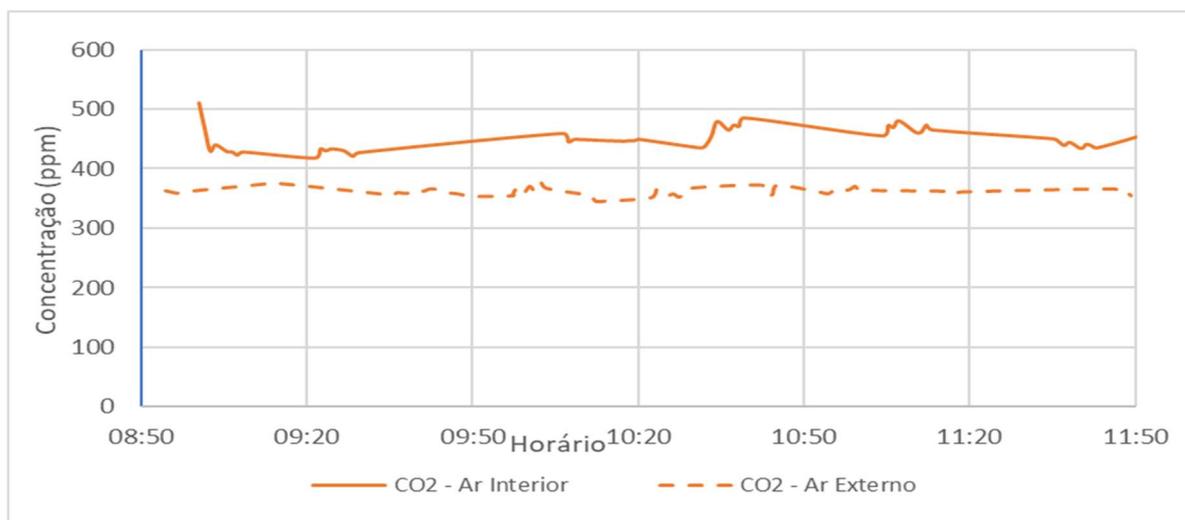


5.2.5. Concentração de CO₂

As concentrações de dióxido de carbono (CO₂) foram monitoradas ao longo do experimento, tanto para o ar externo como para o interior do ambiente condicionado. Os resultados obtidos são apresentados no Gráfico 5.39. Nele pode-se visualizar que as variações de concentrações foram pequenas ao longo do experimento, com os valores no ar externo mantendo-se ao redor de 370 ppm e no ambiente interno no intervalo entre na faixa entre 400 e 500 ppm, bem abaixo

do limite de 1.000 ppm recomendado pela Resolução RE-09 (ANVISA, 2003). Este comportamento do CO₂ no ar interno pode ser explicado pelo perfil de ocupação do ambiente ao longo do experimento, aproximadamente constante e referente apenas aos membros da equipe de medição, ao contrário dos experimentos das oficinas, apresentados no Item 5.1.

Gráfico 5.39: Concentrações de dióxido de carbono (CO₂) ao longo do experimento.

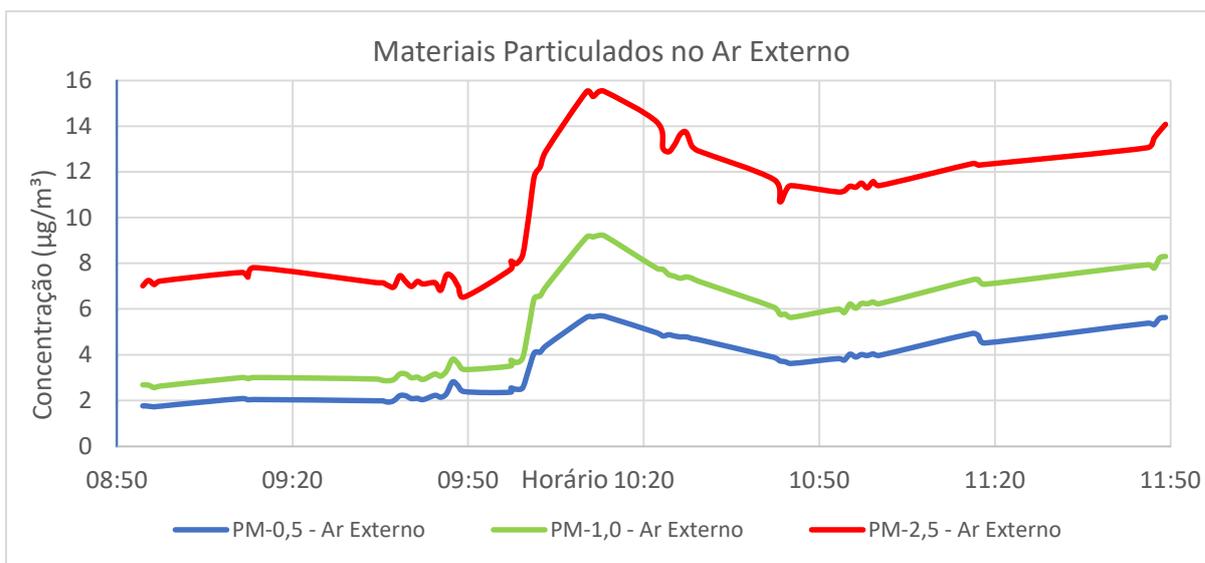
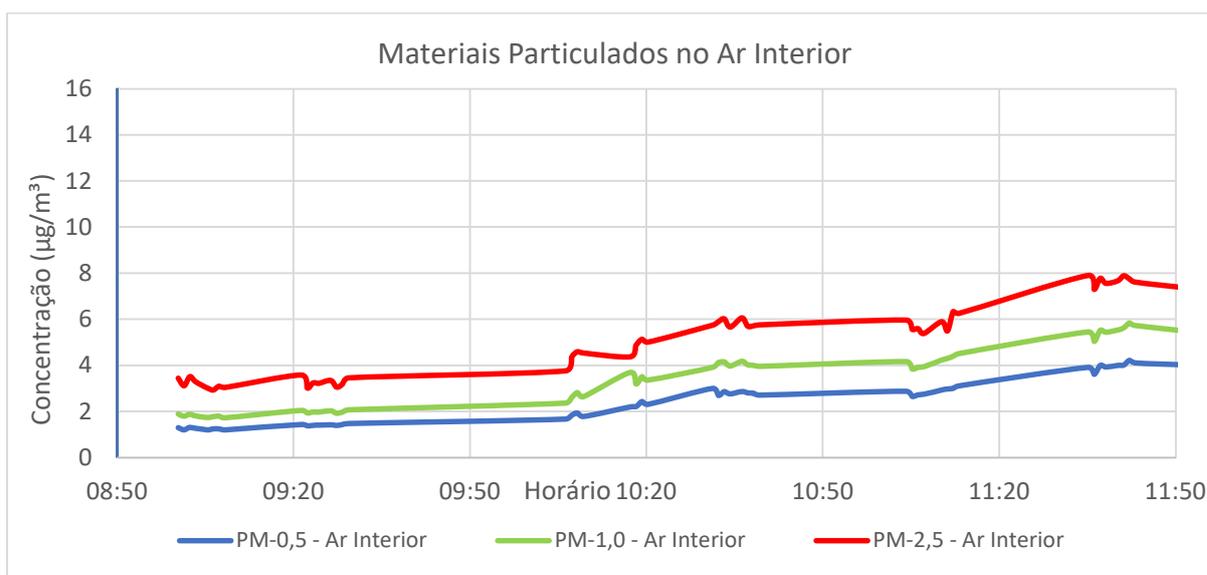


5.2.6. Concentração de particulados (PMs)

Ao longo do experimento proposto com o varredor pneumático, foram monitoradas as concentrações dos particulados finos (PM_{0,5}, PM₁ e PM_{2,5}) e grossos (PM₁₀) no ambiente interno da sala A2 e na área externa. O foco maior foi dado aos particulados finos, devido às condições atípicas verificadas para estes elementos no experimento anterior realizado em 2018, apresentado no Item 5.1.2.4.

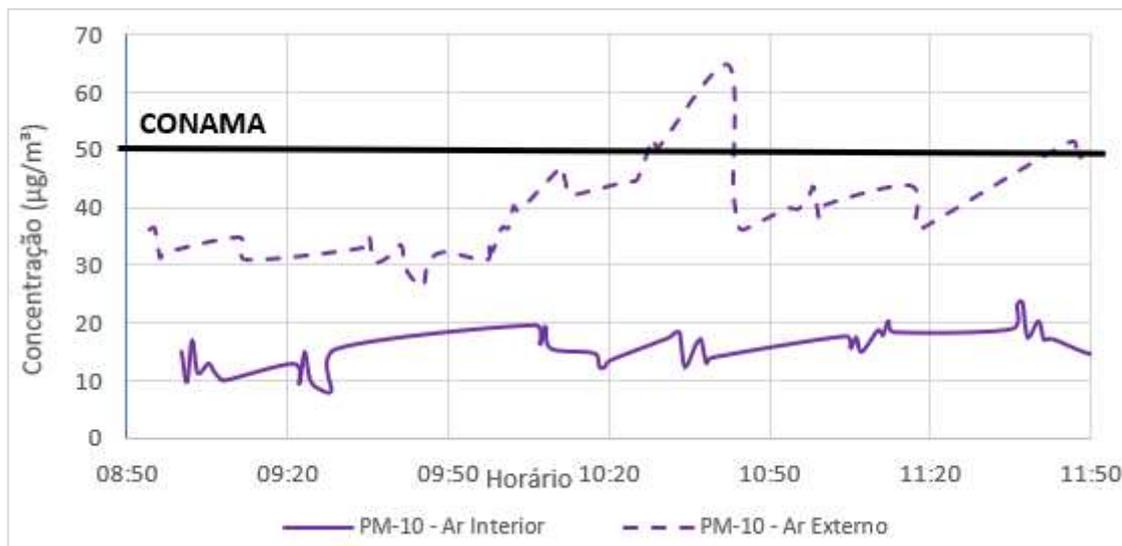
Conforme pode-se visualizar nos gráficos 5.40 e 5.41 a seguir, os valores da concentração de partículas finas no ar exterior obtidos nos resultados das medições foram menores neste experimento de 2020, em relação a 2018. Este fato foi relacionado às condições de agregação provocadas pelas chuvas que ocorreram nos dias anteriores à medição de 2020.

Já no experimento de 2018, realizado em estação climática em que ocorreu menor quantidade de precipitação nos dias anteriores ao evento, os resíduos estavam menos agregados, o que permitiu um maior deslocamento de partículas finas saindo do solo e subindo para o ar, nos locais onde foi desenvolvido o processo de varrição com o soprador.

Gráfico 5.40: Concentrações de materiais particulados finos no ar externo ao longo do experimento.**Gráfico 5.41: Concentrações de materiais particulados finos no ar interior ao longo do experimento**

O Gráfico 5.42, por sua vez, apresenta os resultados das medições realizadas para particulados grossos (PM_{10}) no interior da sala e no ar exterior, próximo às tomadas de ar de renovação do ambiente. Nele podemos visualizar que os valores de concentração de PM_{10} no ar interior mantiveram-se dentro do limite recomendado pela por CONAMA (2018) e pela NBR 16401 (ABNT, 2008), ainda que os valores verificados no ar externo o tenham excedido. De maneira geral, o pico de concentração de PM_{10} verificado no ar exterior ao redor das 10:40, não foi perceptível no interior do ambiente, o que demonstra a atuação adequada do sistema de filtragem de ar da sala, composto por uma caixa de ventilação com filtro G4 + M5.

Gráfico 5.42: Concentrações de materiais particulados grossos PM₁₀ ao longo do experimento.



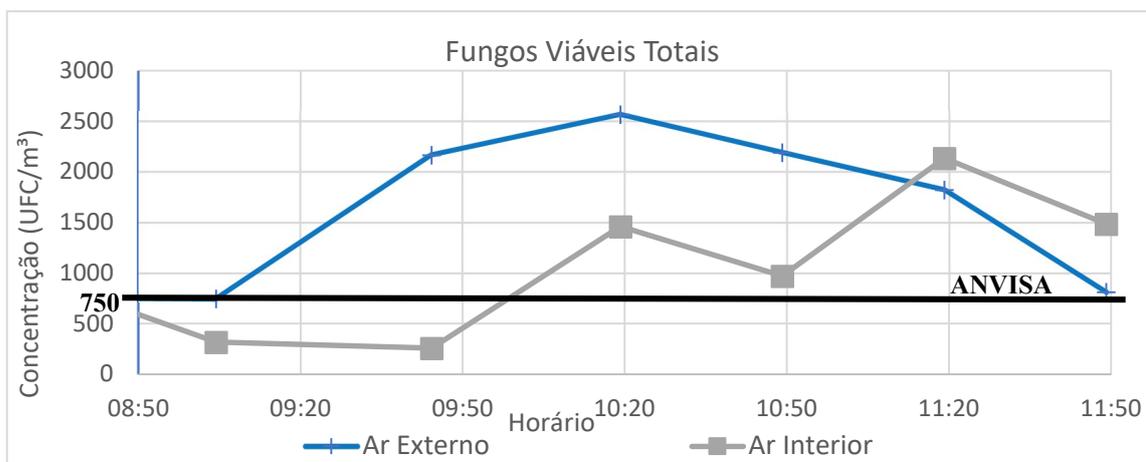
5.2.7. Concentração de fungos viáveis

Concomitantemente à análise dos demais parâmetros da qualidade do ar, foram realizadas, ao longo do experimento, uma série de amostras referentes à agentes microbiológicos, mais especificamente de fungos viáveis no ar externo e no interior do ambiente, conforme procedimento detalhado no Item 4.4.2.1. As amostras foram coletadas em placas de Petri, obtidas através do amostrador de Andersen, sendo posteriormente cultivadas em laboratório, com o apoio da Conforlab, em um ambiente com condições termo-higrométricas controladas. Ao final deste período, realizou-se a contagem dos tipos de fungos presentes nas amostras.

Visualiza-se no Gráfico 5.43 que foram atingidos valores de concentração de fungos viáveis totais no ar interior da ordem de até 1.600 UFC/m³ por volta das 11:20. Este valor é superior ao dobro do limite máximo recomendado pela Resolução RE-09 (ANVISA, 2003) para ambientes internos, de 750 UFC/m³. Isso ilustra como os agentes microbiológicos podem ser um elemento primordial na avaliação da qualidade do ar interior (QAI) de um ambiente, reforçando, desta forma, a importância das análises microbiológicas.

De uma forma geral, a presença de fungos viáveis no ar exterior foi ampliada no intervalo de tempo em que ocorreu a máxima concentração de materiais particulados finos no Gráfico 5.40, indicando uma tendência de comportamento entre estes parâmetros.

Gráfico 5.43: Concentrações de fungos viáveis totais ao longo do experimento.



O detalhamento dos principais gêneros fúngicos presentes nas amostras são detalhados, no Gráfico 5.44 (gênero *Cladosporium sp.*), no Gráfico 5.45 (gênero *Penicillium sp.*) e no Gráfico 5.46 (não esporulados).

Gráfico 5.44: Concentrações de *Cladosporium sp.* ao longo do experimento.

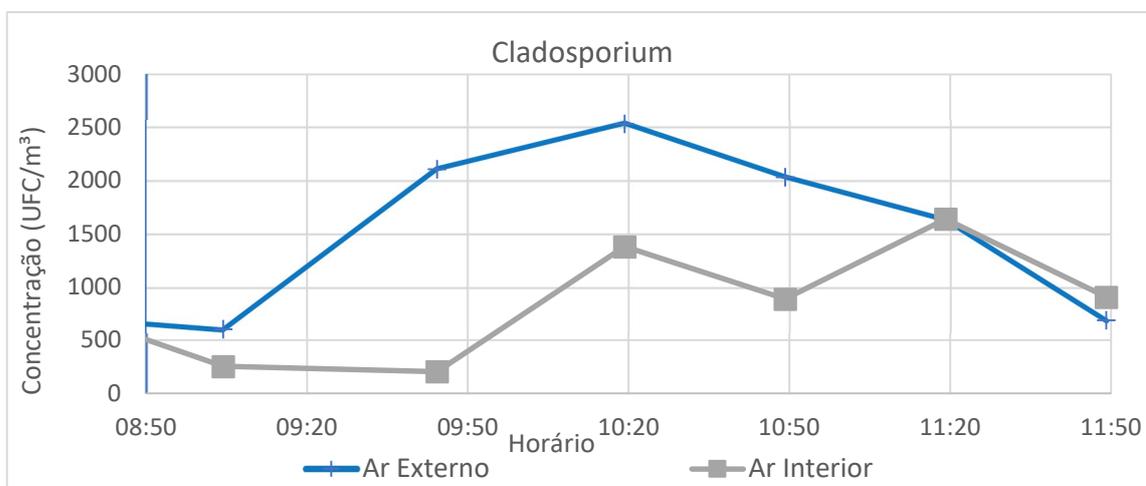


Gráfico 5.45: Concentrações de *Penicillium sp.* ao longo do experimento.

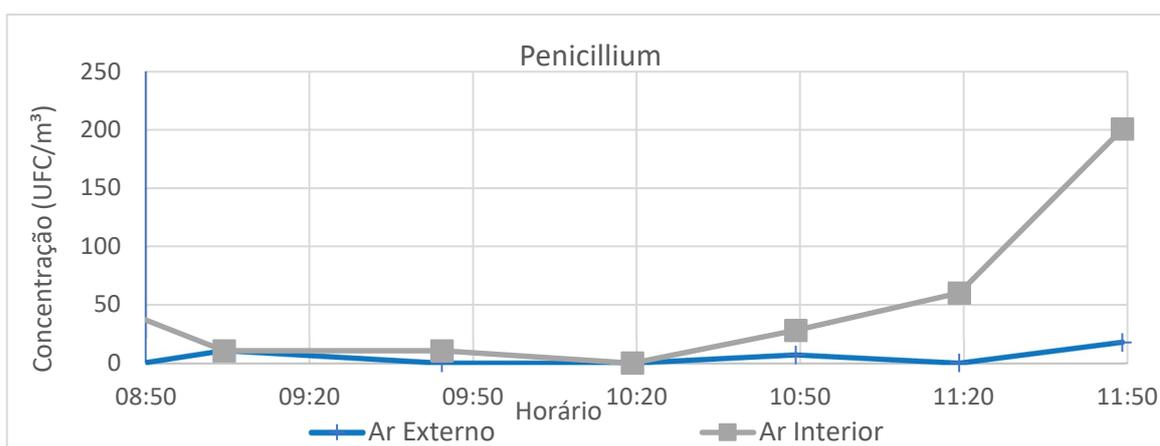
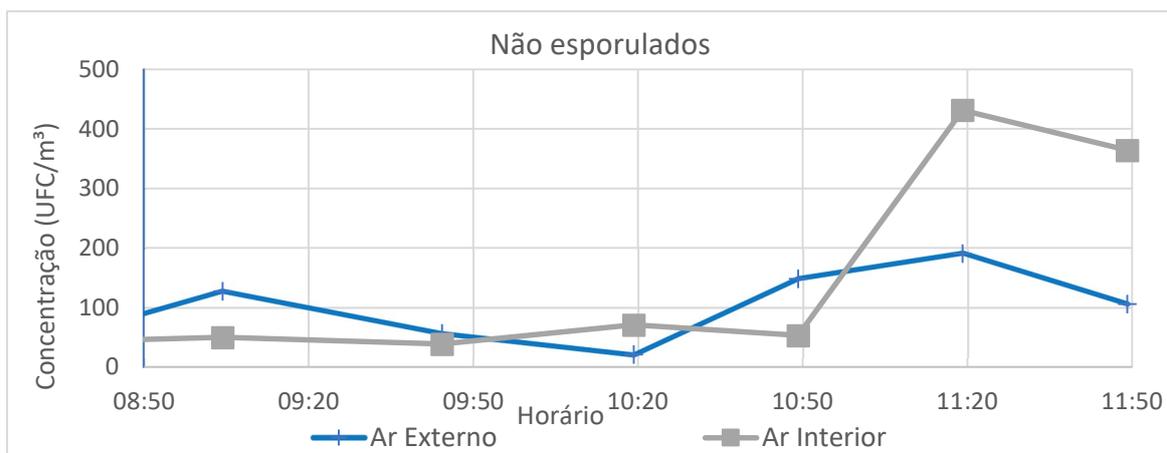


Gráfico 5.46: Concentrações de Não Esporulados ao longo do experimento.

5.2.8. Estudo de correlações

Assim como o realizado anteriormente para as medições realizadas nos eventos das oficinas, detalhado no Item 5.1.3, efetuamos a análise das correlações entre os parâmetros a partir das medidas experimentais obtidas neste experimento do varredor pneumático. Para calcular os valores quantitativos das correlações entre os diversos parâmetros utilizamos novamente o coeficiente de correlação linear de Pearson (R), conforme detalhado na Tabela 4.17.

Na análise deste experimento foram focados os parâmetros de concentração de contaminantes no ar interior e no ar exterior, representados pelas concentrações de materiais particulados (finos e grossos), pela concentração de CO₂ e pelos dados provenientes das análises microbiológicas de concentração de fungos viáveis.

A Tabela 5.6, apresenta a matriz de correlação obtida para as concentrações de particulados de diferentes tamanhos no ar exterior. Para a sua montagem foi utilizado o procedimento conforme proposto em Chernick e Friis (2003). Já na Tabela 5.7, têm-se a matriz referente aos coeficientes de correlação no ar interior, incluindo-se também a correlação dos particulados com a concentração de CO₂ na sala.

Tabela 5.6: Matriz de correlação linear de Pearson entre concentrações de particulados no ar externo.

Correlações entre Concentrações de Materiais Particulados no Ar Externo				
R	PM0,5 Externo	PM1 Externo	PM2,5 Externo	PM10 Externo
PM0,5 Externo	1	1,00	0,98	0,59
PM1 Externo	1,00	1	0,99	0,59
PM2,5 Externo	0,98	0,99	1	0,64
PM10 Externo	0,59	0,59	0,64	1

Tabela 5.7: Matriz de correlação linear de Pearson entre concentrações de particulados e CO₂ internos.

Correlações entre Concentrações de Materiais Particulados e de CO ₂ no Ar Interior					
R	PM0,5 Interno	PM1 Interno	PM2,5 Interno	PM10 Interno	CO ₂ Interno
PM0,5 Interno	1	1,00	0,99	0,30	0,35
PM1 Interno	1,00	1	0,99	0,32	0,37
PM2,5 Interno	0,99	0,99	1	0,38	0,36
PM10 Interno	0,30	0,32	0,38	1	0,13
CO ₂ Interno	0,35	0,37	0,36	0,13	1

Nas Tabelas 5.6 e 5.7 acima, pode-se visualizar a grande correlação positiva, próxima de $R=1$, entre as concentrações dos materiais particulados finos (PM_{0,5}, PM₁ e PM_{2,5}) tanto no ar externo quanto no interior do ambiente condicionado. Isso significa que suas variações ao longo do experimento tenderam a apresentar sentidos e intensidades similares de crescimento ou de decréscimo de concentrações.

Já em relação ao coeficiente de correlação entre os particulados finos e os particulados grossos (PM₁₀), verificou-se, conforme seria esperado, uma correlação positiva entre os parâmetros, porém com intensidade menor do que a correlação entre os particulados finos entre si. Este coeficiente de correlação entre particulados finos e grossos foi maior no ar exterior do que no ar interior, em função da atuação do sistema de filtragem, que possui maior eficiência para os

particulados grossos, além das diferentes taxas de geração de particulados no interior do ambiente.

Já em relação à concentração de CO₂ no interior do ambiente, verificou-se correlação positiva e com um coeficiente de correlação linear de maior intensidade em relação à concentração de particulados finos (PM_{0,5}, PM₁ e PM_{2,5}), do que em relação à concentração de particulados grossos (PM₁₀).

Na Tabela 5.8 e na Tabela 5.9, por sua vez, são apresentados os coeficientes de correlação linear de Pearson entre os valores obtidos de concentração de fungos viáveis nas análises microbiológicas e as concentrações de materiais particulados para o ar externo e o ar interior, respectivamente.

Tabela 5.8: Coeficientes de correlação linear de Pearson entre concentrações de fungos viáveis e de materiais particulados no ar externo.

Correlações entre Concentrações de Fungos Viáveis e Materiais Particulados no Ar Externo				
R	PM _{0,5} Externo	PM ₁ Externo	PM _{2,5} Externo	PM ₁₀ Externo
Fungos Viáveis Externo	0,34	0,38	0,38	0,48

Tabela 5.9: Coeficientes de correlação linear de Pearson entre concentrações de fungos viáveis, de materiais particulados e de CO₂ no ar interior.

Correlações entre Concentrações de Fungos Viáveis, Materiais Particulados e CO ₂ no Ar Interior					
R	PM _{0,5} Interno	PM ₁ Interno	PM _{2,5} Interno	PM ₁₀ Interno	CO ₂ Interno
Fungos Viáveis Interno	0,81	0,83	0,83	0,48	0,13

Verifica-se na Tabela 5.8 correlações positivas entre as variações de concentração de fungos viáveis e de materiais particulados no ar externo, sendo o coeficiente de correlação dos fungos em relação ao PM₁₀ levemente superior em relação ao coeficiente com os particulados finos. Essa pequena diferença, porém, encontra-se dentro do intervalo de confiança para os valores, sendo, portanto, considerado que as correlações entre a concentração dos fungos viáveis e dos diferentes tamanhos de particulados foram da mesma ordem para o ar externo.

Em relação ao ar interior, por sua vez, verifica-se na Tabela 5.9 uma forte correlação positiva entre as concentrações de fungos viáveis e de particulados finos no interior da sala, com um coeficiente de correlação linear de Pearson da ordem de 0,83. Isso indica, que para esta condição do experimento realizado, o monitoramento dos particulados finos pode ser um bom indicador para a avaliação da condição de concentração de fungos viáveis na sala, em função dos parâmetros possuírem comportamentos similares, conforme indicado pelo alto coeficiente de correlação obtido.

Este indicativo pode ser de grande valia uma vez que o monitoramento dos níveis de materiais particulados é mais facilmente realizado, através do uso de medidores portáteis ou contínuos, em relação às análises microbiológicas, que necessitam seguir o procedimento descrito no Item 4.4.2.1, de coleta das amostras, incubação e posterior análise microscópica em laboratório.

A correlação obtida entre as concentrações de fungos viáveis e de particulados grossos (PM₁₀) foi também positiva e similar para as condições do ar externo e do ar interior, da ordem de 0,48, sendo este coeficiente de menor intensidade do que os calculados em relação aos particulados finos para o ar interior.

Em relação ao CO₂, por sua vez, foi obtida uma correlação positiva muito baixa, com coeficiente da ordem de 0,13, em relação às variações de concentração dos fungos viáveis no interior da sala, indicando um comportamento extremamente distinto entre os dois parâmetros no interior do ambiente ao longo do experimento.

Esse fato reforça a hipótese de que o monitoramento exclusivo do CO₂ para avaliação do nível de qualidade do ar interior (QAI) de um dado ambiente pode não representar fidedignamente as condições encontradas para os demais contaminantes, como por exemplo os materiais biológicos, não garantindo assim a obtenção de uma adequada QAI.

Por fim, na Tabela 5.10, são apresentados os valores dos coeficientes de correlação linear de Pearson para as concentrações de cada contaminante no ambiente interno em relação às suas variações de concentração no ar exterior.

Tabela 5.10: Coeficientes de correlação linear de Pearson entre as concentrações de cada contaminantes nos ambientes interno e externo.

Correlações entre as Concentrações de cada Contaminante no Ar Interior e no Ar Externo						
R	PM _{0,5}	PM ₁	PM _{2,5}	PM ₁₀	Fungos Viáveis	CO ₂
Concent. Interno / Externo	0,78	0,76	0,73	0,20	0,24	0,04

Conforme esperado, para todos os contaminantes, as correlações obtidas entre suas variações nos ambientes interno e externo foram positivas. Os coeficientes de correlação obtidos na Tabela 5.10 para os materiais particulados finos (PM_{0,5}, PM₁ e PM_{2,5}) foram muito superiores ao obtido para os particulados grossos (PM₁₀). Isso pode ser relacionado à maior eficiência de filtragem do sistema de renovação para particulados de maiores tamanhos, promovendo um maior nível de separação entre ambientes interno e externo para as partículas grossas (PM₁₀).

Já para os fungos viáveis, o coeficiente de correlação obtido entre as variações de concentração no ar interior e no ar externo foi baixo, da mesma ordem daquele obtido para o PM₁₀. Esse dado corrobora o que foi verificado anteriormente no Gráfico 5.43, no qual a concentração no ar externo teve um pico ao redor das 10:20, enquanto no ar interior o comportamento foi distinto, de uma subida mais progressiva de concentração.

Esse baixo coeficiente de correlação entre o ambiente interno e externo pode indicar uma adequada eficiência do sistema de filtragem de renovação de ar da sala para a captação de parte dos fungos viáveis presentes na área externa, reforçando assim a hipótese de que agentes biológicos são transportados ao interior do ambiente associados a materiais particulados de maiores diâmetros.

Além disso, outro possível fator contribuinte para o baixo coeficiente de correlação entre as áreas é a liberação de agentes biológicos no interior do ambiente durante o processo de troca dos filtros, que requereu a retirada e reinstalação do forro para sua execução.

Finalmente, para o dióxido de carbono (CO₂), verificou-se um coeficiente de correlação linear praticamente nulo entre suas concentrações no ambiente interno e no ambiente externo. Conforme detalhado na Tabela 4.17, isso indica que não há correlação significativa entre as grandezas, sendo a variação na concentração de CO₂ no interior do ambiente relacionada a outros fatores, como a taxa de geração interna referente aos ocupantes.

5.3. Medições com Troca de Filtros de Diferentes Classes de Filtragem

O experimento apresentado no presente item foi desenvolvido para análise dos efeitos de alterações de filtros de diferentes classes e de vazão de ar externo sobre a qualidade do ar interior do ambiente condicionado. Os procedimentos utilizados encontram-se detalhados no Item 4.4.3, tendo sido efetuadas medições de parâmetros relacionados à qualidade do ar ao longo do período de uma manhã, com monitoramento das atividades e medições realizadas no ambiente interno e no ar exterior. Os parâmetros monitorados foram as concentrações de CO₂, de materiais particulados (PM_{0,5}, PM₁, PM_{2,5} e PM₁₀) e de agentes microbiológicos (fungos viáveis), além das condições termo-higrométricas (temperatura e umidade relativa).

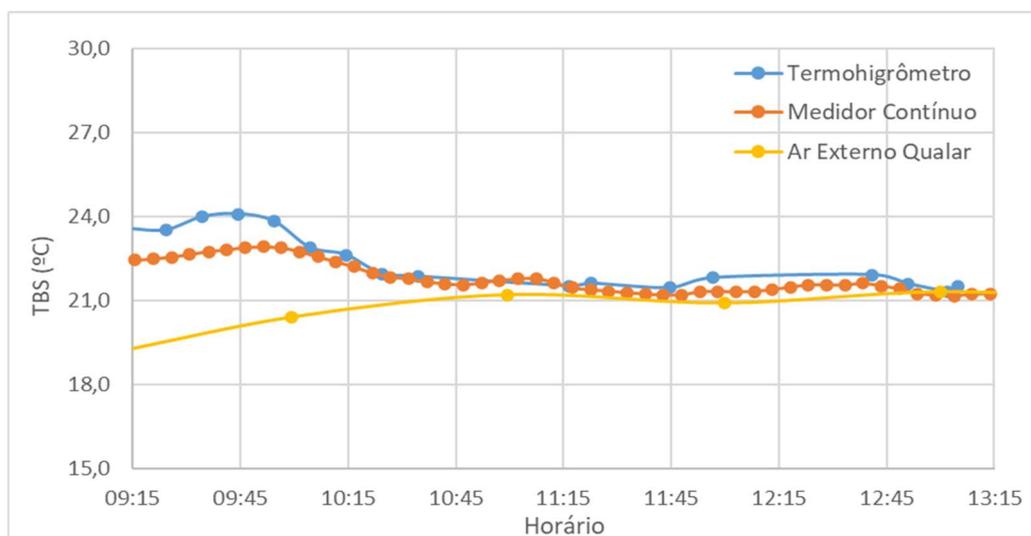
5.3.1. Temperatura e umidade relativa

Para o acompanhamento das condições ambientais na sala foram monitorados ao longo do experimento os parâmetros psicrométricos de temperatura de bulbo seco (TBS) e umidade relativa (UR) do ar no interior do ambiente. Para tal, utilizou-se um termo-higrômetro portátil, descrito no Item 4.5.1, cujas tomadas de medições foram realizadas em intervalos próximos de 10 minutos ao longo do experimento, e um monitor contínuo de parâmetros da qualidade do ar, detalhado no Item 4.5.4, posicionado na parede oposta à lousa, sendo realizada a comparação dos dados obtidos com os dois instrumentos.

Para monitorar as características meteorológicas do ar externo no dia do experimento, foram utilizados como referência os dados disponibilizados pela estação meteorológica do programa Qualar da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), disponível em CETESB (2022), para estação localizada na Marginal Tietê- Ponte dos Remédios. As curvas obtidas para os parâmetros psicrométricos interno ao ambiente com as medições realizadas ao longo do experimento, utilizando o termo-higrômetro e medidor contínuo, assim como as condições do ar externo obtidas da estação meteorológica do Qualar são apresentadas no Gráfico 5.47 e no Gráfico 5.48, para TBS e UR respectivamente.

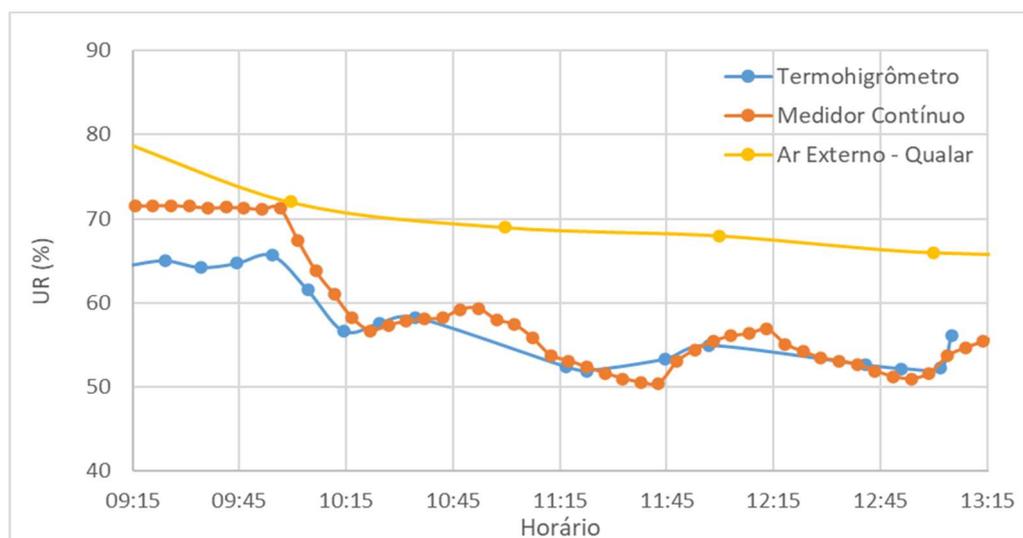
Como condição de referência proposta pela Norma NBR 16401-2 (ABNT, 2008), conforme detalhado no Item 3.2, têm-se para condições de verão a faixa recomendada de temperatura de bulbo seco de 22,5 a 26°C, enquanto para condição de inverno o intervalo é de 21 a 24°C. Já para a umidade relativa faixa recomendada de conforto térmico para o verão é de 35% a 65% e para as condições de inverno de 30% a 60%.

Gráfico 5.47: Variação da temperatura de bulbo seco ao longo do experimento.



Analisando o comportamento das curvas de temperatura de bulbo seco apresentadas no Gráfico 5.47, verifica-se que a temperatura no interior do ambiente manteve-se em valores entre 24°C e 22°C ao longo do experimento realizado, o que se encontra dentro do intervalo recomendado pela NBR 16401-2 (ABNT, 2008).

Gráfico 5.48: Variação da umidade relativa ao longo do experimento.



A umidade relativa interna, por sua vez, manteve-se na maior parte do experimento dentro da faixa recomendada pela NBR 16401-2 (ABNT, 2008), de 30% a 60%, apesar de suas condições na área externa terem sido em sua maioria superiores a este valor. Em relação à comparação entre o instrumento portátil (termo-higrômetro) e medidor contínuo, suas medições em geral apresentaram valores próximos entre si, apenas com pequenas flutuações.

5.3.2. Vazão de ar externo de renovação

Conforme sequência de operação apresentada na Figura 4.17, o número de unidades de renovação de ar ativas foi variado ao longo do experimento, com a operação de duas ou quatro caixas de ventilação insuflando ar externo, sendo realizada a troca dos filtros em intervalos pré-determinados.

A vazão de ar externo em cada difusor dedicado à renovação da sala foi medida através do uso de um medidor de vazão tipo coifa, conforme modelo detalhado na Tabela 4.12. Os dados de vazão de renovação de ar para a sala são apresentados no Gráfico 5.49.

Gráfico 5.49: Variação da vazão de ar externo ao longo do experimento.



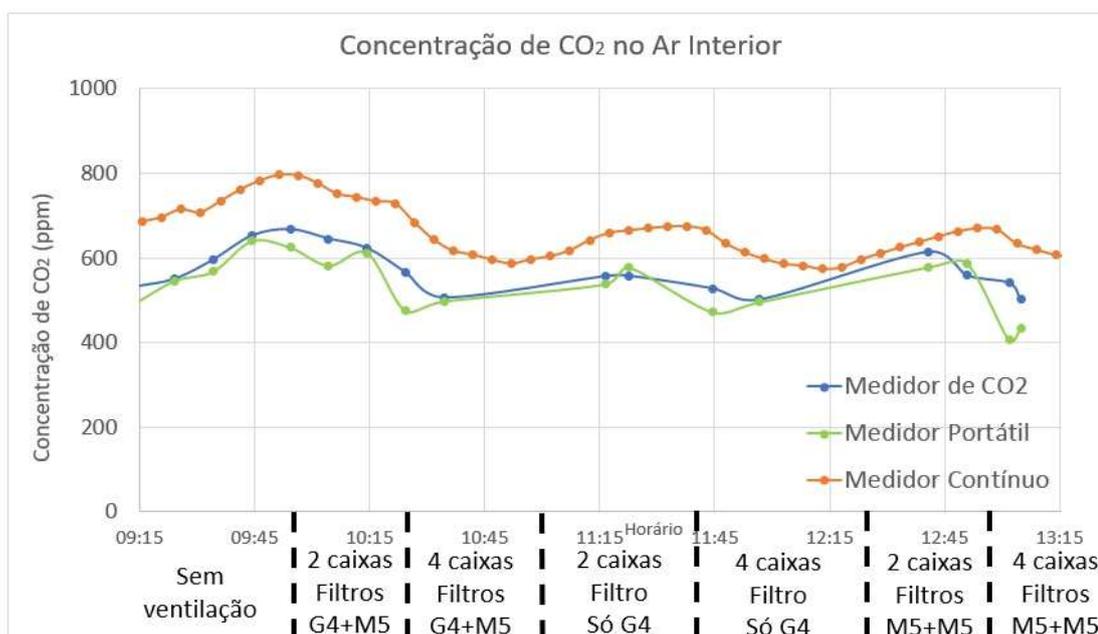
Conforme pode-se visualizar no gráfico, a vazão de ar externo para renovação variou ao longo do experimento entre os patamares de 1.000 m³/h e 2.150 m³/h para as condições em que duas ou quatro caixas de ventilação estavam em operação, respectivamente. As substituições dos filtros de ar, que poderiam apresentar diferenças de perdas de pressão associadas às classes de filtros, não provocaram uma mudança significativa na vazão total de ar de renovação. Isso pode ser explicado pelo fato de os filtros utilizados serem novos, e, portanto, operando com valores baixos de perdas de carga (perdas típicas de início de operação).

5.3.3. Concentração de CO₂

A concentração de CO₂ no interior da sala foi monitorada ao longo do experimento. Para tal, foram utilizados diferentes modelos de instrumentos, dentre eles um medidor exclusivo de CO₂, que utiliza o princípio ótico para mensuração da concentração do gás, detalhado no Item 4.5.2, e um equipamento de monitoramento contínuo de parâmetros da qualidade do ar, disponível no Item 4.5.4.

Verifica-se no Gráfico 5.50 que a diferença entre as medidas dos instrumentos se encontra dentro da faixa de valores das respectivas incertezas, apresentadas na Tabela 4.16. De uma forma geral, os valores de concentração de CO₂ do ar interior ao longo do experimento se mantiveram abaixo do limite de 1.000 ppm recomendado por ANVISA (2003). Ao contrário das medições nas oficinas, apresentadas no Item 5.1, a ocupação da sala durante o experimento se restringiu aos integrantes da equipe de medição.

Gráfico 5.50: Variação da concentração de CO₂ no ar interior ao longo do experimento.



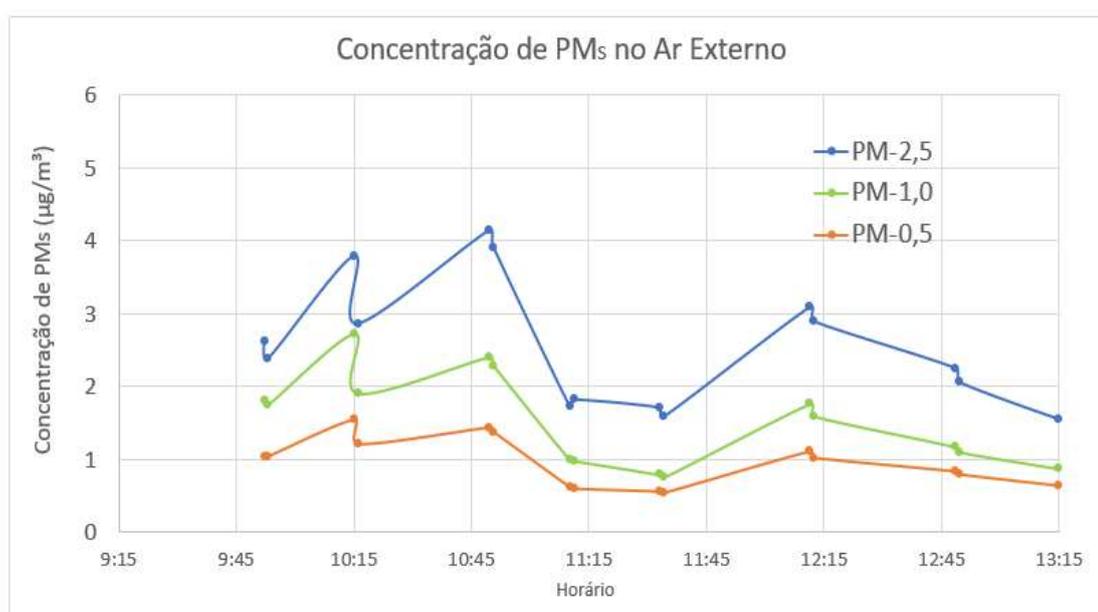
Outro importante ponto que pode ser visualizado no Gráfico 5.50 é a tendência de redução da concentração de CO₂ no interior do ambiente nos momentos em que foram acionadas as quatro unidades de renovação de ar, conforme linha do tempo indicada no área inferior do gráfico. Esse fato pode ser relacionado ao efeito de diluição do ar no interior da sala promovido pela maior taxa de renovação de ar empregada.

5.3.4. Concentração de particulados (PMs)

Para o monitoramento da concentração de materiais particulados presentes no ar interior e no ar externo utilizou-se um contador de partículas, cujas especificações encontram-se detalhadas no Item 4.5.3. Os valores obtidos na monitoração da concentração de materiais particulados finos, para os diferentes tamanhos avaliados ($PM_{2,5}$, PM_1 e $PM_{0,5}$), podem ser visualizados no Gráfico 5.51 e no Gráfico 5.52, referentes ao ar exterior e o ar interno, respectivamente.

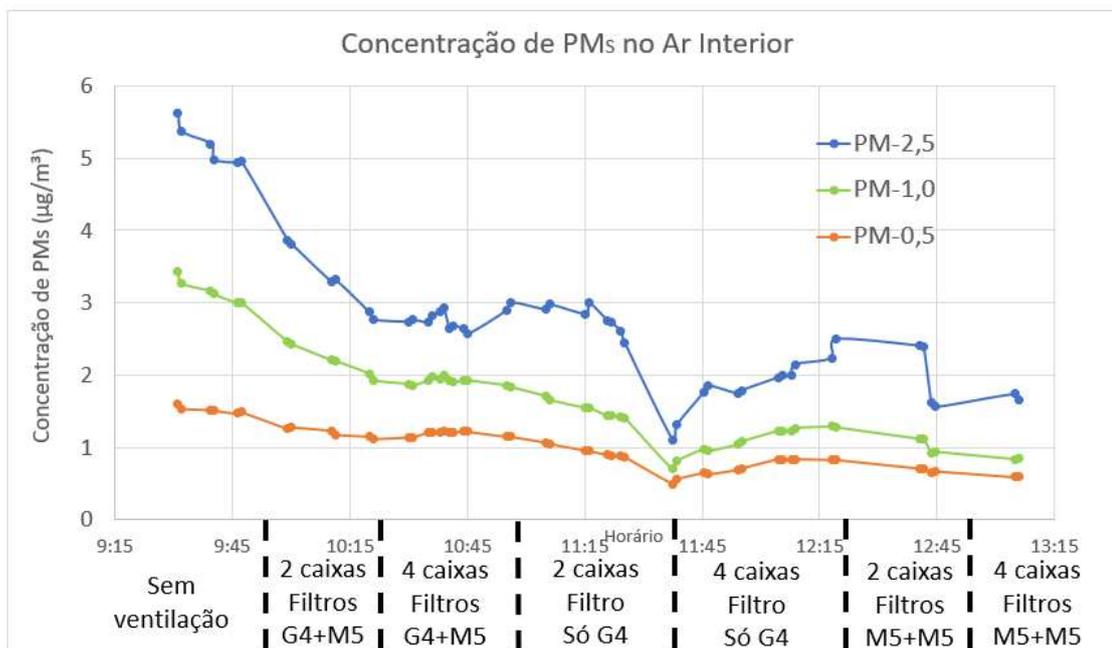
Visualiza-se no Gráfico 5.51 que a concentração de materiais particulados presentes no ar externo variou no período de realização dos ensaios, atingindo seus menores valores próximos das 11:30. As tendências de variação na concentração de particulados de diferentes tamanhos apresentam comportamentos similares, apontando que o perfil de composição dos materiais particulados no ar manteve-se aproximadamente constante ao longo do período monitorado.

Gráfico 5.51: Variação da concentração de particulados finos no ar externo ao longo do experimento.



De forma geral, os valores de concentração de particulados verificados no ar externo foram relativamente baixos, com pico de $PM_{2,5}$ obtido na faixa de $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A título de comparação, no Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2018), baseado em WHO (2005), estabelece um limite de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para a exposição média diária ao $PM_{2,5}$, conforme detalhado no Item 3.4.1.

Gráfico 5.52: Variação da concentração de particulados finos no ar interior ao longo do experimento.



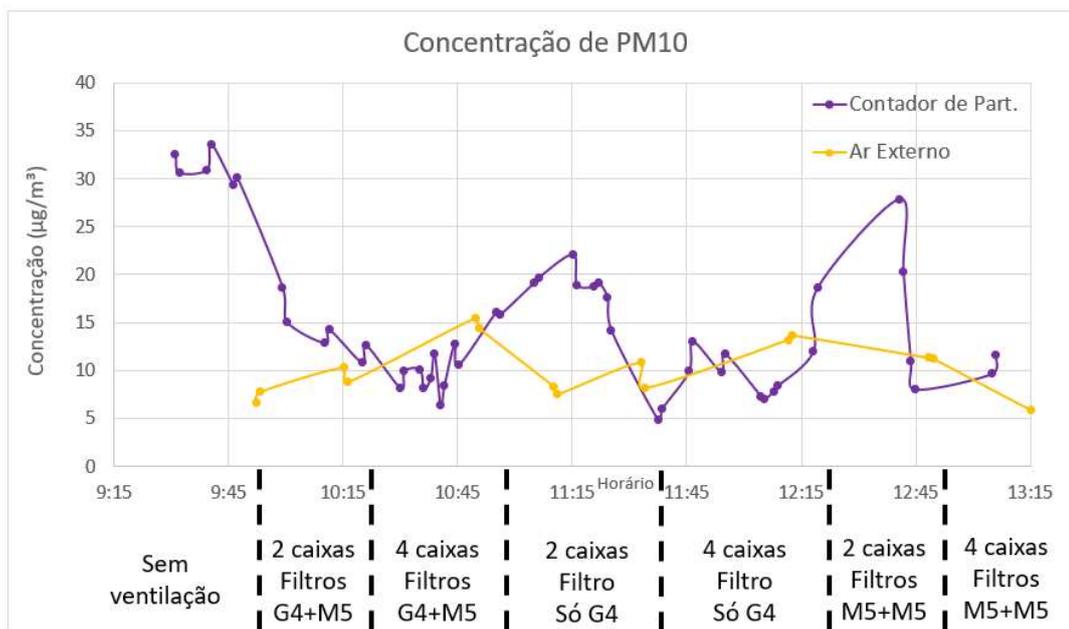
Para os valores de concentração de particulados no ar interior, verifica-se no Gráfico 5.52 que os níveis encontrados no ambiente durante o início do ensaio eram consideravelmente superiores aos do ar externo. Na medida em que o sistema de condicionamento e renovação de ar foram acionados, por sua vez, estes níveis de concentração no ar interior tenderam a apresentar uma redução progressiva, aproximando-se daqueles obtidos na área externa.

Após esta primeira fase de diluição de contaminantes na sala, os perfis das curvas de concentração de particulados no ar interno tenderam a acompanhar as variações verificadas nos níveis presentes no ar exterior, dados no Gráfico 5.51, geralmente com um certo atraso na resposta no ar interior em relação à variação no ar externo.

Em alguns momentos as concentrações no interior do ambiente atingiram valores inferiores àquelas verificadas no ar externo, indicando a atuação dos filtros das unidades de renovação de ar na redução dos níveis de concentração de particulados no interior da sala. Não se percebeu, porém, uma diferença significativa entre o comportamento com filtros de diferentes classes de filtragem, por exemplo entre G4+M5 e M5+M5, em função também da própria variação dos níveis de concentração no ambiente externo, que influenciou os resultados no ambiente interno.

No Gráfico 5.53, são apresentados os resultados das medições realizadas para os particulados grossos (PM₁₀) ao longo do experimento, para o interior da sala e no ar externo de renovação.

Gráfico 5.53: Variação da concentração de particulados grossos PM₁₀ ao longo do experimento.



Pode-se visualizar no Gráfico 5.53 que a concentração de particulados internos apresentou maiores variações do que os valores monitorados na área externa, com picos de concentração verificados no início do experimento e ao redor das 11:15 e das 12:45. Estes picos podem ser relacionados ao processo de troca de filtros, que envolveu a retirada e colocação do forro do teto da sala, que provocou uma liberação de materiais particulados no ambiente.

Apesar da presença destes picos, contudo, a concentração de PM₁₀ no interior da sala manteve-se sempre abaixo do limite de 50 µg/m³ recomendado pela NBR 16401 (ABNT, 2008), não tendo sido verificada uma alteração significativa do comportamento do parâmetro no interior da sala com a alteração das classes de filtragem dos filtros de renovação de ar.

5.3.5. Concentração de fungos viáveis

Os agentes microbiológicos foram avaliados no presente experimento por meio da análise da concentração de fungos viáveis presentes no ar interior e no ar externo. Para tal, foram coletadas amostras em intervalos de tempo pré-definidos, através de um amostrador de Andersen, com o emprego de placas de Petri, com ágar dextrose, devidamente preparadas e identificadas. Estas amostras coletadas foram então encaminhadas ao laboratório, com o apoio da Conforlab, onde passaram por um período de incubação com duração de uma semana, em condição de temperatura e umidade controladas, de forma a permitir o crescimento das colônias, a identificação dos principais gêneros fúngicos presentes e a posterior contagem morfológica das

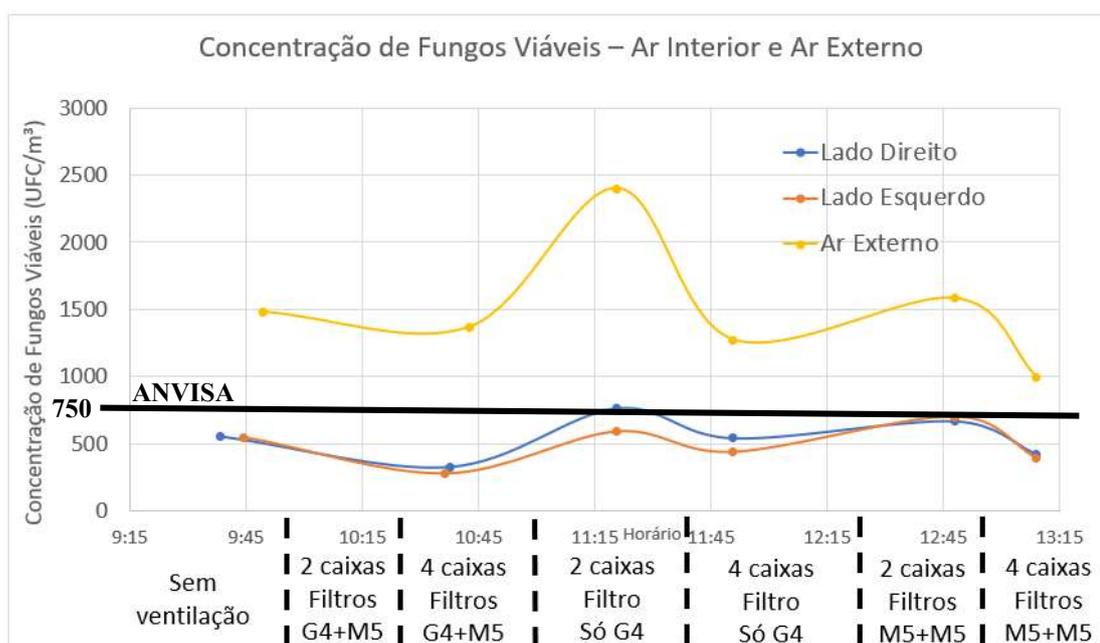
Unidades Formadoras de Colônias (UFC), com o auxílio de um microscópio, conforme procedimento detalhado no Item 4.4.2.1.

Os resultados de concentração de fungos viáveis totais obtidos após a análise laboratorial, com base nas amostras coletadas ao longo do experimento, são apresentados no Gráfico 5.54, no qual estão representadas as curvas obtidas para as medições realizadas em dois pontos definidos no interior da sala, no lado esquerdo e no lado direito, e um ponto na área externa, posicionado próximo às tomadas de ar das caixas de renovação, conforme Figuras 4.19 e 4.20.

Visualiza-se no Gráfico 5.54 que, apesar serem verificados valores altos de concentração de fungos viáveis no ar externo, da ordem de até 2.400 UFC/m³ por volta das 11:20, os níveis verificados no interior do ambiente, em ambos os lados da sala, mantiveram-se em geral inferiores ao limite de 750 UFC/m³, conforme limite recomendado pela Resolução RE-09 (ANVISA, 2003). Os principais gêneros fúngicos presentes nas amostras foram *Cladosporium sp.* e *Penicillium sp.*

Em relação ao comportamento das curvas, pôde-se verificar uma tendência de acompanhamento dos perfis das curvas no ar interior com as variações de concentração no ar externo, porém com uma grande atenuação nos picos e valores de ordens significativamente inferiores. Isso indica uma atuação do sistema de filtragem de ar das caixas de renovação da sala para a retenção de parte dos fungos viáveis antes de atingirem o interior do ambiente.

Gráfico 5.54: Variação da concentração de fungos viáveis totais ao longo do experimento.



Da mesma forma que o verificado para os materiais particulados no Item 5.3.4, não foi possível identificar diferenças significativas entre o comportamento dos fungos viáveis no ar interior com a troca dos filtros de diferentes classes de filtragem utilizados nas caixas de renovação de ar da sala, sendo o perfil das curvas obtidas para o ar interior fortemente influenciadas pelas variações do nível de contaminantes no ar externo.

Em relação às medições realizadas em diferentes pontos da sala, no lado direito, mais próximo à porta de entrada, e do lado esquerdo, mais próximo ao insuflamento dos difusores das caixas de renovação, não se verificou em geral diferenças significativas entre as medições realizadas em cada ponto em um dado momento, com exceção do instante próximo ao pico de concentração no ar externo, às 11:20, no qual a concentração do lado direito foi um pouco superior àquela obtida do lado esquerdo, porém ambas ainda dentro da margem de incertezas das medições, conforme apresentadas na Tabela 4.16.

5.3.6. Estudo de correlações

Para a análise das correlações entre os diversos parâmetros monitorados durante este ensaio com troca de filtros de diferentes classes de filtragem foi utilizado, assim como nos demais experimentos, o coeficiente de correlação linear de Pearson (R), detalhado na Tabela 4.17. Na análise deste experimento, assim como realizado no experimento do varredor pneumático do Item 5.2.8, o foco foi direcionado aos parâmetros de concentração de contaminantes no ar interior e no ar externo, representados pelas concentrações de materiais particulados (finos e grossos), CO₂ e fungos viáveis, advindos das análises microbiológicas.

A Tabela 5.11 apresenta a matriz de correlação obtida para as concentrações de particulados de diferentes tamanhos no ar exterior. Para a sua montagem foi utilizado o procedimento conforme proposto em Chernick e Friis (2003). Na Tabela 5.12, por sua vez, é apresentada a matriz referente aos contaminantes no ar interior, incluindo-se a correlação dos particulados com a concentração de CO₂ na sala.

Da mesma forma que havia sido verificado para o experimento do varredor pneumático, pode-se visualizar uma grande correlação positiva, próxima de R=1, entre as concentrações dos materiais particulados finos (PM_{0,5}, PM₁ e PM_{2,5}) tanto no ar externo quanto no interior do ambiente condicionado. Neste caso, porém, apresentou-se também uma correlação de grande intensidade entre os materiais particulados grossos (PM₁₀) e os materiais particulados finos

(PM_{2,5}), o que pode ser justificado pela maior quantidade de particulados finos presentes no ar neste ensaio do que no dia das medições referentes ao experimento do varredor pneumático.

Tabela 5.11: Matriz de correlação linear de Pearson entre concentrações de particulados no ar externo.

Correlações entre Concentrações de Materiais Particulados no Ar Externo				
R	PM0,5 Externo	PM1 Externo	PM2,5 Externo	PM10 Externo
PM0,5 Externo	1	0,99	0,97	0,58
PM1 Externo	0,99	1	0,96	0,52
PM2,5 Externo	0,97	0,96	1	0,74
PM10 Externo	0,58	0,52	0,74	1

Tabela 5.12: Matriz de correlação linear de Pearson entre concentrações de particulados e CO₂ internos.

Correlações entre Concentrações de Materiais Particulados e de CO₂ no Ar Interior					
R	PM0,5 Interno	PM1 Interno	PM2,5 Interno	PM10 Interno	CO₂ Interno
PM0,5 Interno	1	0,97	0,90	0,55	0,61
PM1 Interno	0,97	1	0,97	0,67	0,64
PM2,5 Interno	0,90	0,97	1	0,83	0,65
PM10 Interno	0,55	0,67	0,83	1	0,52
CO₂ Interno	0,61	0,64	0,65	0,52	1

Em relação à concentração de CO₂ no interior do ambiente, verificou-se novamente correlação positiva e com um coeficiente de correlação de maior intensidade com a concentração de particulados finos (PM_{0,5}, PM₁ e PM_{2,5}), em comparação com os particulados grossos (PM₁₀).

Nas Tabelas 5.13 e 5.14, por sua vez, são apresentados os coeficientes de correlação linear de Pearson entre os valores de concentração de fungos viáveis totais, levantados através das análises microbiológicas, e as concentrações de materiais particulados para o ar externo e o ar interior, respectivamente.

Tabela 5.13: Coeficientes de correlação linear de Pearson entre concentrações de fungos viáveis e de materiais particulados no ar externo.

Correlações entre Concentrações de Fungos Viáveis e Materiais Particulados no Ar Externo				
R	PM0,5 Externo	PM1 Externo	PM2,5 Externo	PM10 Externo
Fungos Viáveis Externo	-0,43	-0,38	-0,28	0,37

Tabela 5.14: Coeficientes de correlação linear de Pearson entre concentrações de fungos viáveis, de materiais particulados e de CO₂ no ar interior.

Correlações entre Concentrações de Fungos Viáveis e Materiais Particulados no Ar Interno					
R	PM0,5 Interno	PM1 Interno	PM2,5 Interno	PM10 Interno	CO2 Interno
Fungos Viáveis Interno	-0,16	-0,08	0,02	0,32	0,68

Verifica-se na Tabela 5.13 correlações que chegam a ter valores negativos entre as variações de concentração de fungos viáveis e de materiais particulados finos no ar externo, ao contrário do experimento com o varredor pneumático, para o qual havia sido verificado um fator alto de correlação entre esses parâmetros, conforme apresentado.

Em relação ao PM₁₀, por sua vez, o coeficiente de correlação obtido no ar externo em relação aos fungos viáveis na Tabela 5.14 é de ordem similar ao obtido anteriormente na Tabela 5.8 do ensaio com o varredor. Esse fato nos dá uma indicação de que o coeficiente de correlação obtido para este parâmetro é mais consistente.

Em relação ao ar interior, por sua vez, verifica-se na Tabela 5.14 uma correlação quase nula entre os particulados finos e os fungos viáveis no interior da sala, situação oposta ao que havia sido verificado na Tabela 5.9 para o experimento do varredor pneumático, na qual havia sido verificada uma correlação muito forte entre esses parâmetros naquele ensaio. Isso pode ser devido aos níveis de concentração muito baixos de particulados finos verificado no dia do experimento. Já para o PM₁₀, manteve-se uma correlação positiva entre este parâmetro e os fungos viáveis, indicando que este possa ser um bom parâmetro para representação de seu comportamento no ambiente sob uma maior amplitude de condições.

Em relação ao CO₂, por sua vez, neste experimento foi obtida uma correlação de significava intensidade entre a sua concentração e o nível de fungos viáveis no interior da sala, com as variações nestes parâmetros apresentando um comportamento similar. Para isso, pode ser avaliado se neste ensaio a produção de contaminantes no interior da sala esteve relacionada com a ação dos ocupantes, sendo que a maior alteração de procedimento em relação ao experimento anterior, do varredor pneumático, foi a realização da substituição dos filtros de ar durante os ensaios.

Por fim, na Tabela 5.15, são apresentados os valores dos coeficientes de correlação linear de Pearson para as concentrações de cada contaminante no ambiente interno em relação às suas variações de concentração no ar exterior.

Tabela 5.15: Coeficientes de correlação linear de Pearson entre as concentrações de cada contaminantes nos ambientes interno e externo.

Correlações entre as Concentrações de cada Contaminante no Ar Interior e no Ar Externo					
R	PM_{0,5}	PM₁	PM_{2,5}	PM₁₀	Fungos Viáveis
Concent. Interno / Externo	0,75	0,76	0,50	0,05	0,69

Para todos os contaminantes, as correlações obtidas entre suas variações nos ambientes interno e externo foram positivas. Para os particulados grossos (PM₁₀), porém, essa correlação foi praticamente nula, o que pode ser justificado pela maior eficiência de filtragem do sistema de renovação de ar da sala para esse tipo de particulado e pela possível liberação no interior do ambiente de contaminantes durante o processo de troca de filtros.

Os coeficientes de correlação obtidos na Tabela 5.15 para os materiais particulados finos (PM_{0,5}, PM₁ e PM_{2,5}) entre os ambientes interno e externo foram novamente muito superiores ao obtido para os particulados grossos (PM₁₀). Esse fato havia sido verificado anteriormente também para o experimento do varredor pneumático, na Tabela 5.10, corroborando a grande similaridade de comportamento destes contaminantes nos ambientes externo e interno.

Para os fungos viáveis, o coeficiente de correlação obtido entre as variações de concentração no ar interior e no ar externo neste caso foi alto, de ordem mais próxima daqueles obtidos para os particulados finos, indicando uma grande tendência de comportamento deste parâmetro nos

ambientes interno e externo, apesar da existência do pico verificado no ar externo ao redor das 11:20, que não foi replicado no interior da sala, conforme visualizado no Gráfico 5.54.

De uma forma geral, o sistema de filtragem das caixas de renovação de ar apresentou uma atuação importante na redução da concentração de fungos viáveis no interior da sala, quando comparado aos altos níveis verificados na área externa. Isso também foi válido em relação aos materiais particulados, que, apesar dos níveis baixos no ar externo, a concentração obtida no ar interior foi ainda inferior em muitos momentos, indicando uma retenção de parte dos contaminantes pelo sistema de filtragem.

Assim como para os níveis de materiais particulados, porém, não foi possível individualizar os efeitos referentes às alterações dos diferentes classes de filtragem sobre a concentração de fungos viáveis na sala, devido à influência da variação dos níveis de contaminantes no ar externo ao longo do experimento.

6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho propõe um estudo acerca do comportamento de parâmetros que definem a Qualidade do Ar Interior (QAI) em um ambiente condicionado, com foco em instalações de ensino. Nos parâmetros monitorados nas análises estão incluídos dióxido de carbono (CO₂), materiais particulados finos (PM_{0,5}, PM₁ e PM_{2,5}) e grossos (PM₁₀), agentes biológicos (fungos viáveis) e propriedades psicrométricas, como temperatura (TBS) e umidade relativa (UR). Os conjuntos de parâmetros foram monitorados em ensaios realizados nas instalações da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, na Sala A2 do prédio da Engenharia Mecânica, cujas características foram detalhadas no Item 4.3.1.

O estudo do comportamento das grandezas selecionadas foi parametrizado de modo a obter as possíveis correlações entre elas, sendo utilizado para tal avaliação o coeficiente de correlação linear de Pearson (R), cujo método de cálculo foi apresentado no Item 4.7. Também foram avaliadas as influências sobre as grandezas medidas ocasionadas pela variação de três fatores: vazão de ar externo de renovação, características dos filtros utilizados para o ar externo e tipo de atividade desempenhada pelos ocupantes.

Em relação às dificuldades encontradas durante a realização do presente trabalho, o advento da pandemia do Coronavírus (COVID-19) provocou restrições na implementação das obras de instalação do LEQAI (Laboratório de Estudo da Qualidade do Ar de Interiores). Por este motivo, os experimentos foram todos realizados na Sala A2 do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP.

Devido ainda à pandemia e às limitações impostas à ocupação de ambientes coletivos, com a mudança da forma de ministrar aulas da EPUSP, passadas para a modalidade remota, a realização de ensaios experimentais nos moldes dos eventos realizados na fase inicial da pesquisa foi impossibilitada. Com o cancelamento das edições das Oficinas de Carrinhos de Rolimã e Oficinas de Brinquedos de 2020 e 2021, o grupo do LEQAI realizou ensaios experimentais direcionados para monitorar aspectos específicos da qualidade do ar, como as análises da influência do varredor pneumático e da troca de filtros com diferentes classes de filtragem para o ar exterior, conforme os procedimentos detalhados nos itens 4.4.2 e 4.4.3.

As conclusões apresentadas a seguir estão suportadas pelos resultados obtidos nos experimentos, pelas análises apresentadas e consideram o comportamento dos valores do coeficiente de correlação de Pearson (R).

Em relação ao primeiro tipo de ensaio realizado, das medições nas oficinas, apresentado no Item 5.1, verificou-se, em relação às grandezas termo-higrométricas, uma forte correlação positiva entre a umidade relativa do interior da sala com a do ambiente externo, com valores para $R=0,88$ (Tabela 5.1) indicando uma grande influência das condições climáticas do local externo sobre este parâmetro do ar interior. Isso pode ser explicado pela ausência de controle de umidade no sistema de climatização da sala, permitindo sua oscilação ao longo do dia, tendo, contudo, na maioria dos períodos, a umidade e a temperatura internas sido mantidas dentro das condições recomendadas por ANVISA (2003).

Em relação ao nível de dióxido de carbono (CO_2) verifica-se nas oficinas que a correlação entre as concentrações no ambiente interno e no externo foi extremamente baixa com $R=0,04$ (Tabela 5.10), indicando que as variações em seus níveis no interior da sala ao longo dos eventos foram fruto de outros fatores, considerando ainda que as concentrações de CO_2 no ar externo durante os experimentos não tiveram oscilações relevantes. Verifica-se, contudo, duas variáveis que influenciaram significativamente a concentração de CO_2 no ar interno: o número de pessoas ocupantes, que apresenta correlação positiva $R=0,71$ (Tabela 5.3), e a vazão específica de ar externo, com correlação negativa $R=-0,47$ (Tabela 5.3). Estes são resultados esperados, e que colaboram na verificação da eficiência deste coeficiente de correlação, R, para avaliar estes parâmetros, inclusive sua capacidade de indicar o comportamento das grandezas em função da intensidade de seus valores.

Quanto aos níveis de materiais particulados, verifica-se que a correlação entre as concentrações de particulados no ar interior e no ar externo, apresenta, na Tabela 5.10, valores maiores para material de menor tamanho, com $R=0,78$, $R=0,76$ e $R=0,73$, respectivamente para $PM_{0,5}$, PM_1 e $PM_{2,5}$, comparativamente ao valor para partículas maiores, como $R=0,20$ para o PM_{10} . Estas correlações com resultados positivos indicam a influência de concentrações no ar externo sobre o ar interior. O valor de $R=0,20$ para o PM_{10} , também está relacionado, nos diferentes experimentos realizados, com a maior capacidade de retenção dos filtros de ar para partículas de maior dimensão e com a taxa de produção de partículas maiores ser superior às de menor tamanho, nas atividades realizadas no ambiente.

A adoção de vazões específicas de ar externo próximas da exigência da ANVISA (2003) durante as oficinas, como indicado nos Gráficos 5.29 e 5.30, foi suficiente para reduzir a concentração de CO₂, porém não foi suficiente para reverter totalmente a elevação da concentração de PM₁₀ na sala, apresentada nos Gráficos 5.31 e 5.32. Tal fato demonstra uma maior criticidade do parâmetro concentração de particulado para a qualidade do ar no ambiente, o que pode requerer maiores vazões de ar externo filtrado nos sistemas AVAC que atendem aplicações em que a fonte de poluentes está relacionada a material particulado.

As análises de agentes microbiológicos no presente trabalho estão relacionadas com a concentração de fungos viáveis, que foi monitorada nos experimentos realizados para avaliação de efeitos do varredor pneumático (Item 5.2), e da mudança de filtros adotando diferentes classes de filtragem (Item 5.3), na QAI do ambiente monitorado.

No experimento com o varredor pneumático, verificou-se que a presença de fungos viáveis no ar foi ampliada nos instantes de aumento da concentração de particulados, acompanhando principalmente o crescimento daqueles identificados como finos, mas também seguindo o particulado grosso, o que indica uma tendência de comportamento associando estes dois parâmetros, concentração microbiológica e particulado, neste experimento. Esse indicativo foi corroborado pelo cálculo dos coeficientes de correlação. Na Tabela 5.8, em que os coeficientes de correlação relacionam a concentração de fungos e de particulado no ar externo, os valores variam desde R=0,34 para PM_{0,5}, R=0,38 para PM₁ e PM_{2,5}, até R=0,48 para PM₁₀, indicando que a presença no ar destes dois fatores pode estar correlacionada, com tendências semelhantes. Para o ar interior, conforme resultados apresentados na Tabela 5.9, o coeficiente de correlação tem valores R entre 0,81 e 0,83 para os particulados finos e R=0,48 para particulado grosso (PM₁₀), indicando novamente e com maior intensidade a relação existente entre a concentração de particulados e de fungos no ar. Adicionalmente, para o ar interior, na Tabela 5.9, verifica-se um coeficiente de correlação com valor R=0,13 entre fungos e o CO₂, muito diferente dos valores de R para os particulados.

No experimento com troca de filtros adotando diferentes classes de filtragem, por sua vez, a correlação entre as concentrações de materiais particulados finos e de fungos viáveis não foi verificada, com resultados para R negativos ou próximos de zero (Tabelas 5.13 e 5.14). Mas, neste mesmo experimento, o coeficiente de correlação R associando concentrações de particulado grosso (PM₁₀) e de fungos viáveis foi da mesma ordem de grandeza, (0,32<R<0,37), daquela que havia sido obtida no experimento com o varredor.

De uma forma geral, com os resultados obtidos a partir dos experimentos e análises realizadas no presente estudo, pode-se concluir que monitorar apenas a concentração de dióxido de carbono (CO_2) no interior do ambiente condicionado, conforme realizado em muitas instalações de AVAC existentes atualmente, não é condição suficiente para garantir uma adequada qualidade do ar interior para os ocupantes, especialmente se outros poluentes tem prevalência, como os casos dos particulados estudados.

Os gráficos obtidos dos parâmetros e os coeficientes de correlação calculados demonstram que, para se obter uma satisfatória QAI no interior de um dado ambiente, faz-se necessária a avaliação concomitante de um conjunto de parâmetros, dentre os quais se destacam, além da concentração de CO_2 , o monitoramento dos valores de concentração para materiais particulados e para agentes microbiológicos no ar interior.

Na pesquisa bibliográfica, foi verificado que há poucos trabalhos na literatura que realizam a análise utilizando correlações entre os parâmetros da qualidade do ar interior em um ambiente ocupado. Há principalmente trabalhos relacionando resultados de variação na vazão de ar externo e seus efeitos mais gerais, e não específicos em cada uma das grandezas como aqui estudado. Neste ponto, os resultados obtidos no presente estudo trazem uma proposta nova, e o resultado de sua implementação, com a aplicação do coeficiente de correlação linear de Pearson, pode ser uma importante ferramenta para a análise do comportamento e da interação entre os diversos parâmetros e variáveis envolvidos na qualidade do ar interior (QAI).

As informações providas por valores dos coeficientes de correlação podem oferecer subsídios para definições em um projeto de um sistema AVAC, auxiliando a verificação de qual parâmetro pode ser mais crítico para uma dada aplicação e quais soluções e variáveis serão mais efetivas para a redução de poluentes no ar interior do ambiente. Isto pode ocorrer especialmente no dimensionamento do sistema de renovação de ar, e nos filtros a serem utilizados, otimizando-se, desta forma, a qualidade do ar interior da instalação projetada.

Em relação às análises microbiológicas, este estudo avaliou a concentração de fungos viáveis e sua influência na obtenção de uma adequada qualidade do ar interior. Os coeficientes de correlação linear calculados a partir dos experimentos fornecem uma forte indicação de que a possibilidade de transporte de microrganismos pelos materiais particulados é real e deve ser considerada. Algumas variações entre os resultados obtidos nos ensaios, porém, indicam a necessidade da realização de novos experimentos, sob diferentes condições, com repetição e

ampliação do universo de dados medidos, de modo a permitir uma avaliação mais detalhada das correlações, de forma a consolidar associação entre causas e efeitos, e também de se obter um bom número de correlações entre as concentrações de materiais particulados e de agentes microbiológicos em ambientes climatizados.

Com o avanço da implementação das futuras instalações do Laboratório de Estudo da Qualidade do Ar de Interiores (LEQAI), melhores recursos estarão disponíveis, permitindo a ampliação dos experimentos, inclusive alargando e detalhando os resultados obtidos no presente trabalho. Desta forma, haverá maiores possibilidades de novas contribuições com o desenvolvimento de outros projetos, utilizando-se a estrutura de medição do novo laboratório para futuros trabalhos a serem desenvolvidos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma NBR 16401-1-2008. **Instalações de ar-condicionado -Sistemas centrais e unitários - Parte 1: Projetos das Instalações.** Brasil, 2008.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma NBR 16401-2-2008. **Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários - Parte 2: Parâmetros de Conforto Térmico.** Brasil, 2008.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma NBR 16401-3-2008. **Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários - Parte 3: Qualidade do Ar Interior.** 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.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 16890: Filtros de ar para ventilação em geral Parte 1: Especificações técnicas, requisitos e sistema de classificação baseado na eficiência do material particulado (ePM).** Brasil, 2018.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 16890: Filtros de ar para ventilação em geral Parte 3: Determinação da arrestância inicial e da resistência ao fluxo de ar versus a massa de pó de ensaio acumulada.** Brasil, 2019.

ABRAVA - Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento. Recomendação Normativa RENABRAVA II, de abril de 2000. **Qualidade do ar interior em sistemas de condicionamento de ar e ventilação para conforto.** São Paulo, 2020.

ABRAVA - Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento. Recomendação Normativa RENABRAVA 09, de abril de 2020. **Renovação de ar em sistemas de AVAC-R para reduzir o risco de contaminação de pessoas com o vírus SARS-CoV-2.** São Paulo, 2020.

ACA- American Cancer Society. **Formaldehyde**. Last Revised: May 23, 2014. Disponível em: <https://www.cancer.org/cancer/cancer-causes/formaldehyde.html>. Acessado em março de 2022.

ACURITE. **Professional Weather Center model 02064C / 999143 – Instruction Manual**. Disponível em: <https://www.acurite.com/>. Acessado em março de 2022.

AIHA- American Industrial Hygiene Foundation. **Joint Consensus Statement on Addressing the Aerosol Transmission of SARS CoV-2 and Recommendations for Preventing Occupational Exposures**. February 1, 2021.

ALA- American Lung Association. **Indoor Air Pollutants and Health – Volatile Organic Compounds**. Last updated: February 12, 2020. Disponível em: <https://www.lung.org/clean-air/at-home/indoor-air-pollutants/volatile-organic-compounds> Acessado em março de 2022.

ANALITIS, A.; KATSOUYANNI, K.; DIMAKOPOULOU, K.; SAMOLI, E.; NIKOLOULOPOULOS, A. K.; PETASAKIS, Y.; TOULOUMI, G.; SCHWARTZ, J.; ANDERSON, H. R.; CAMBRA, K.; FORASTIERE, F.; ZMIROU, D.; M VONK, J.; CLANCY, L.; KRIZ, B.; BOBVOS, J.; PEKKANEN, J. **Short-term effects of ambient particles on cardiovascular and respiratory mortality**. *Epidemiology*, 17(2) p.230-233, March, 2006.

ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução RE N°09, de 16 de janeiro de 2003–Dispõe sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior em Ambientes Climatizado Artificialmente de Uso Público e Coletivo**. Ministério da Saúde. Brasil, 2003.

ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução RDC N° 166, de 24 de julho de 2017 –Dispõe sobre a validação de métodos analíticos e dá outras providências**. Ministério da Saúde. Brasil, 2017.

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Guia da Qualidade para Sistemas de Tratamento de Ar e Monitoramento Ambiental**. Brasil, 2013.

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers. **Indoor Air Quality Guide**. Best Practices for Design, Construction and Commissioning. Inc.: Atlanta, 2010

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers. Standard 55-2010. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**, Inc.: Atlanta, 2010.

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers. Standard 62.1-2013. **Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality**, Inc.: Atlanta, 2013.

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers. Standard 52.2-2017. **Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size**, Inc.: Atlanta, 2017.

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers. **ASHRAE Position Document on Filtration and Air Cleaning**. Atlanta, 2018.

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers. **ASHRAE Position Document on Infectious Aerosols**. Atlanta, 2020.

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers. **ASHRAE Position Document on Indoor Air Quality**. Atlanta, 2020.

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers. **ASHRAE Epidemic Task Force Laboratory Subcommittee Guidance Document**. Atlanta, 2020.

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers. **ASHRAE Reopening Schools and Universities C19 Guidance**. Atlanta, 2020.

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers. **ASHRAE Epidemic Task Force Releases Updated Airborne Transmission Guidance**. Atlanta, 2021.

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers. **Filtration/Disinfection**. Disponível em <https://www.ashrae.org/technical-resources/filtration-disinfection>. Acessado em março de 2022.

ASTM - American Society for Testing and Materials. Standard ASTM D6245-18. **Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation**. USA, 2018.

BECKMAN. **Evaluating a Laser Diffraction Instrument for Accuracy**. Beckman Coulter, Inc. Fullerton, California, USA, 2009.

BISHARA, A. J.; HITNER, J. B. **Confidence Intervals for Correlations When Data Are Not Normal**. *Psychonomic Society, Inc.* 2016.

BOLLIGER JR, R.; MARIANI, A. L. C. **Sistemas de Ar Condicionado e Ventilação**. Apostila do curso “Ar Condicionado e Ventilação”. EPUSP, São Paulo, 2012.

BOLLIGER JR, R.; MARIANI, A. L. C. **Módulo II: Psicometria**. Apostila do curso “XX Programa Smacna de Educação Continuada em Tratamento de Ar”. São Paulo, 2016.

BORDINI, M. D.; **Qualidade do Ar no Interior de Ambientes Climatizados** – Trabalho de conclusão de curso apresentado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.

BRASIL. Norma Regulamentadora NR-15 - Atividades e Operações Insalubres. Anexo N°11. **Agentes Químicos cuja Insalubridade É Caracterizada por Limite de Tolerância e Inspeção no Local de Trabalho**. Ministério do Trabalho. Brasil, 1978.

CARRER, P.; FERNANDES, E. O.; SANTOS, H.; HÄNNINEN, O.; KEPHALOPOULOS, S.; WARGOCKI, P. **On the Development of Health-Based Ventilation Guidelines: Principles and Framework**. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. June, 2018.

CARRIER -**Split Space Série 42XQM – Manual de Instalação, Operação e Manutenção**. Disponível em: <https://carrierdobrasil.com.br/>. Acessado em março de 2022.

CDC - Centers for Disease Control and Prevention. **Particle Pollution**. National Center for Environmental Health. Last reviewed September 4, 2019. Disponível em: https://www.cdc.gov/air/particulate_matter.html. Acessado em março de 2022.

CDC - Centers for Disease Control and Prevention. **Scientific Brief: SARS-CoV-2 Transmission**. U.S. Department of Health & Human Services. Updated May 7, 2021. Disponível em: <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/science/science-briefs/sars-cov-2-transmission.html>. Acessado em março de 2022.

CEN - European Committee for Standardization. Standard EN 13.779-2007. **Ventilation for non-residential buildings - Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems.** Brussels, 2007.

CEN - European Committee for Standardization. Standard EN 779-2012. **Particulate air filters for general ventilation - Determination of the filtration performance.** Brussels, 2012.

CEN - European Committee for Standardization. Standard EN 12341-2014. **Ambient air—standard gravimetric measurement method for the determination of the PM10 or PM2,5 mass concentration of suspended particulate matter.** Brussels, 2014.

CEN - European Committee for Standardization. Standard EN 16.798-1-2019. **Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics - Module M1-6.** Brussels, 2019.

CEN - European Committee for Standardization. Standard EN 16.798-2-2019. **Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 2: Interpretation of the requirements in EN 16798-1 - Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics (Module M1-6).** Brussels, 2019.

CEN - European Committee for Standardization. Standard EN 16.798-3-2017. **Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 3: For non-residential buildings - Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems (Modules M5-1, M5-4).** Brussels, 2017.

CEN - European Committee for Standardization. Standard EN 16.798-5-2017. **Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 5-1: Calculation methods for energy requirements of ventilation and air conditioning systems (Modules M5-6, M5-8, M6-5, M6-8, M7-5, M7-8) - Method 1: Distribution and generation.** Brussels, 2017.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Estudo Técnico Para Avaliar e Propor Prazo para o Início da Vigência da Meta Intermediária Etapa 2 (MI2) de acordo com o Artigo 8º do Decreto Estadual N° 59.113/2013.** São Paulo. Atualizado em maio de 2021.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Padrões de Qualidade do Ar**. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/>. Acessado em março de 2022.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Poluentes**. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>. Acessado em março de 2022.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Qualidade do Ar – Dados Horários**. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/dados-horarios/>. Acessado em março de 2022.

CHEN, Y.A.; ALMEIDA, J.S.; RICHARDS, A. J.; MÜLLER, P.; CARROLL, R. J.; ROHRER, B. **A nonparametric approach to detect nonlinear correlation in gene expression**. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, page 552 to 568, September, 2010.

CHERNICK, M.R.; FRIIS, R.H. **Introductory Biostatistics for the Health Sciences: Modern Applications Including Bootstrap**. 1st ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução N°491, de 19 de novembro de 2018 - Dispõe sobre padrões de qualidade do ar**. Ministério do Meio Ambiente. Brasil, 2018.

CONSEMA-Conselho Estadual do Meio Ambiente. **Deliberação CONSEMA nº 04/2021 de 19 de maio de 2021 - Convalida o Estudo Técnico da CETESB para avaliação e proposta de início de vigência da Meta Intermediária Etapa 2 (MI2)**. São Paulo, 2022.

COSTA NETO, P.L.O. **Estatística**. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2002.

COX, A. J.; DEWEERD, A. J.; LINDEN, J., **An experiment to measure Mie and Rayleigh total scattering cross sections**. *American Journal of Physics*, June, 2002.

COZAC, L.; AIKAWA, A. **Análise do Comportamento do Dióxido de Carbono em Ambientes Internos**. *ABRAVA*. 2022. Disponível em: <https://abrava.com.br/analise-do-comportamento-do-dioxido-de-carbono-em-ambientes-internos-por-eng-leonardo-cozac/>. Acessado em março de 2022.

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.

DAL POGETO, F.; MARIANI, A. L. C.; GUILHOTTI, S. L.; PIMENTA, M. M. **Avaliação Experimental da Qualidade de Ar em Salas de Aula**. Trabalho apresentado no 11º Congresso Internacional de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação – Mercofrio. Porto Alegre, 2018.

DANTE, F.; BISORDI, G. **Estudo da qualidade do ar interior em instituição de ensino**. Trabalho de conclusão de curso apresentado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2020.

DARBY, S.; HILL, D.; AUVINEN, A.; BARROS-DIOS, J. M.; BAYSSON, H.; BOCHICCHIO, F.; DEO, H.; FALK, R.; FORASTIERE, F.; HAKAMA, M.; HEID, I.; KREIENBROCK, L.; KREUZER, M.; LAGARDE, F.; MÄKELÄINEN, I.; MUIRHEAD, C.; OBERAIGNER, W.; PERSHAGEN, G.; RUANO-RAVINA, A.; RUOSTEENOJA, E.; ROSARIO, A. S.; TIRMARCHE, M.; TOMÁBEK, L.; WHITLEY, E.; WICHMANN, H. E.; DOLL, R. **Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies**. *BMJ*, December 21, 2014.

DE GIDS, W.F.; WOULTERS. **CO₂ as Indicator for the Indoor Air Quality: General Principles**. Air Filtration and Ventilation Centre (AIVC) *Ventilation Information Paper*, N°33, July, 2010.

DHS–Wisconsin Department of Health Services. **Carbon Dioxide**. Last Revised: June 3, 2021. Disponível em: <https://www.dhs.wisconsin.gov/chemical/carbondioxide.htm>. Acessado em março de 2022.

DIAS, J. W. C. **Amostrador De Bioaerossóis De Um Estágio / N6 – Manual de Operação**. Energética Qualidade do Ar. Revisão 06. Rio de Janeiro, 2010.

EYKELBOSH, A. **Can CO₂ Sensors be Used to Assess COVID-19 Transmission Risk?** National Collaborating Centre for Environmental Health (NCCEH). Vancouver, January 15, 2021. Disponível em: <https://ncceh.ca/content/blog/can-co2-sensors-be-used-assess-covid-19-transmission-risk>. Acessado em março de 2022.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **Draft Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2020**. 2022. Disponível em: <https://www.epa.gov/ghgemissions/draft-inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-9-sinks-1990-2020>. Acessado em março de 2022.

EPA –United States Environmental Protection Agency. **Particulate Matter (PM) Pollution: What is PM, and how does it get into the air?** 2022. Disponível em: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM> Acessado em março de 2022.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **Overview of Greenhouse Gases.** Disponível em: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>. Acessado em março de 2022.

EUROVENT–European Industry Association for Indoor Climate, Process Cooling, and Food Cold Chain Technologies. **Selection of EN ISO 16890 Rated Air Filter Classes for General Ventilation Applications.** Eurovent 4/23. Brussels, October 1, 2018.

FAKHOURY, N.A. **Estudo da Qualidade do Ar Interior em Ambientes Educacionais.** Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2016.

FISK, W. J.; MIRER, A. G.; MENDELL, M. J. **Quantitative relationship of sick building syndrome symptoms with ventilation rates.** *Indoor Air*, 19: p. 159–165, 2009.

FISK, W. J.; WARGOCKI P.; ZHANG, X., **Do Indoor CO₂ Levels Directly Affect Perceived Air Quality, Health, or Work Performance?** *ASHRAE Journal*, page 70 to 77, September, 2019.

FRONDIZI, C. A. **Contadores de Partículas - Diretrizes para Seleção de um Contador.** Energética Qualidade do Ar. Rio de Janeiro, 2005.

FUJII, R. K. **Avaliação da Qualidade do Ar em Duas Estações do Metrô de São Paulo.** Tese (Mestrado) – Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2006.

GAEF- Gesellschaft für Aerosolforschung (Association for Aerosol Research). **Position paper of the Gesellschaft für Aerosolforschung on understanding the role of aerosol particles in SARS-CoV-2 infection.** December 17, 2020.

GUILHOTI, S.L. **Estudo do comportamento dinâmico de poluentes em um laboratório educacional climatizado.** Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2021.

GRAYWOLF. **PC-3016A – 6-Channel Particle Counter – Particulate Meter Brochure.**

Disponível em: <https://graywolfsensing.com/>. Acessado em março de 2022.

HAGAN, D. H.; KROLL, J. H. **Assessing the accuracy of 1 low-cost optical particle2 sensors using a physics-based approach.** *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*. 2020.

HAVERINEN-SHAUGHNESSY, U.; SHAUGHNESSY, R. J.; COLE, E.C.; TOYINBO, O. MOSCHANDREAS, D. J. **An assessment of indoor environmental quality in schools and its association with health and performance.** *Building and Environment*. 2015.

HEALTH CANADA- Environmental Health Directorate - Health Protection Branch. **Exposure Guidelines for Residential Indoor Air Quality:** A Report of the Federal-Provincial Advisory Committee on Environmental and Occupational Health. Minister of Supply and Services. Canada, 1995.

HEMERKA, J.; VYBÍRAL, P. **Filter Class Conversion between ČSNEN 779 and ČSN EN ISO16890-1.** *Heating, Ventilation, Installation*, 29(4), p. 201-207, 2020.

HOFFMANN, W. **Estudo para seleção de filtros de ar para sistemas de climatização para conforto revisão da Norma NBR 16401.** São Paulo, Novembro de 2015.

HOMIS. **Termo-higrômetro - HTH-154 – HOMIS.** São Paulo, 2022. Disponível em <https://www.homis.com.br/outros/termo-higrometro-hth-154-homis>. Acessado em março de 2022.

INMETRO. **Avaliação de dados de medição:** Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008. Duque de Caxias, Rio de Janeiro, Brasil, 141 p., 2012.

ISO - International Organization for Standardization. Standard ISO 16890-1-2016. **Air filters for general ventilation — Part 1: Technical specifications, requirements and classification system based upon particulate matter efficiency (ePM).** Geneva, 2016.

ISO - International Organization for Standardization. Standard ISO 16890-2-2016. **Air filters for general ventilation — Part 2: Measurement of fractional efficiency and air flow resistance.** Geneva, 2016.

ISO - International Organization for Standardization. Standard ISO 16890-3-2016. **Air filters for general ventilation — Part 3: Determination of the gravimetric efficiency and the air flow resistance versus the mass of test dust captured.** Geneva, 2016.

ISO - International Organization for Standardization. Standard ISO 7730-2005. **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.** Geneva, 2005.

ISO/IEC - International Organization for Standardization / International Electrotechnical Commission. ISO/IEC GUIDE 98-3:2008. **Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM:1995).** Geneva, 2008.

JACKSON, R. B.; FRIEDLINGSTEIN, P.; LE QUERE, C.; ABERNETHY, S.; ANDREW, R. M.; CANADELL, J. G.; CIAIS, P.; DAVIS, S. J.; DENG, Z.; LIU, Z.; PETERS, G. P. **Global fossil carbon emissions rebound near pre-COVID-19 levels.** *Environmental Research Letters*, 17, N°3, 2022.

JANSSEN, J. E. **The History of Ventilation and Temperature Control.** *ASHRAE Journal*, page 47 to 52, September, 1999.

JENKLINS, P.L.; PHILLIPS, T.J., MULBERG, J.M., HUI, S.P. **Activity patterns of Californians: Use of and proximity to indoor pollutant sources.** *Atmospheric Environment*, 26A, p. 291-297, 1992.

KUNDU, S.; STONEA, E.A. **Composition and sources of fine particulate matter across urban and rural sites in the Midwestern United States.** *Environmental Science Processes & Impacts*, 16(6): p. 1360–1370, May, 2014.

LEE, K.; CHOI, J. H.; LEE, S.; PARK, H. J.; OH, Y.J.; KIM, G.B.; LEE, W.S.; SON, B.S. **Indoor levels of volatile organic compounds and formaldehyde from emission sources at elderly care centers in Korea.** *PLOS One Journal*. June 7, 2018.

LIGHTHOUSE. **Handheld Particle Counter Model 3016 / 5016 - Operating manual.** Lighthouse Worldwide Solutions. 2005.

LONGEAUX, G. **How to measure the “nonlinear correlation” between multiple variables?** A presentation of the information and prediction scores. *Analytics Vidhya*, Aug. 20, 2020.

MARIANI, A.L.C. **Controle de Umidade e a Qualidade dos Ambientes Internos**. Artigo para a revista ABRAVA + Climatização e Refrigeração. São Paulo, Abril de 2019.

MARIANI, A.L.C. **Uso do ar condicionado durante a pandemia**. Palestra apresentada no 5º Seminário Internacional de Qualidade do Ar de Interiores. São Paulo, Setembro de 2020.

MENDELL, M. J.; HEATH, G. A. **Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance?** A critical review of the literature. *Indoor Air*. 15, p. 27-52, 2005.

MENDELL, M. J.; ELISEEVA, E. A.; DAVIES, M. M.; SPEARS, M.; LOBSCHIED, A.; FISK, W. J.; APTE, M. G. **Association of classroom ventilation with reduced illness absence:** a prospective study in California elementary schools. *Indoor Air*. 23, p. 515–528, 2013.

MENDELL, M. J.; WYON, D. P.; SUNDELL, J.; CLAUSEN, G.; FANGER, P. O. **The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity.** *Indoor Air*, 10(4): p. 222-36, 2000.

MENDES, L.B.; OGINK, N. W. M.; EDOUARD, N.; VAN DOOREN, H. J. C.; TINÔCO, I. F. F.; MOSQUERA, J. **NDIR Gas Sensor for Spatial Monitoring of Carbon Dioxide Concentrations in Naturally Ventilated Livestock Buildings.** *Sensors Journal*, 15, p. 11239-11257, 2015.

MULTIVAC-Ventilador com filtragem do ar para renovação de ar em ambientes condicionados – CFM. Disponível em: <https://www.multivac.com.br/>. Acessado em março de 2022.

MULTIVAC-Ventilador centrífugo em linha para exaustão ou insuflamento de ar – AXC. Disponível em: <https://www.multivac.com.br/>. Acessado em março de 2022.

OLESEN, B. W. **Indoor Environment:** Health, Comfort and Productivity. In: 8th REHVA WORLD CONGRESS. Lausanne, Oct. 9-12, 2005.

OLESEN, B. W. **Human comfort and self-estimated performance in relation to indoor environmental parameters and building features.** In: 4º Seminário Internacional de Qualidade do Ar de Interiores. São Paulo, April 10, 2015.

OLESEN, B. W.; KAZANCI, O. B.; BOGATU, D.I.; COAKLEY, D. **The use of CO₂ as an indicator for indoor air quality and control of ventilation according to EN16798-1 and TR16798-2.** Roomvent, 2020.

OMNI ELECTRÔNICA, **A tecnologia SPIRI no combate à COVID-19.** São Paulo, 2022. Disponível em: <https://www.spiri.pro/>. Acessado em março de 2022.

POPE, C.A., III; BURNETT, R.T.; THUN, M.J.; CALLE, E.E.; KREWSKI, D.; ITO, K.; THURSTON, G.D. **Cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution.** *Journal of American Medical Association*, 287, p.1132-1141, 2002.

PRADO, N. Y. S.; ARGENTON, R.L. **Estudos experimentais de microrganismos no ar de ambientes educacionais.** Trabalho de conclusão de curso apresentado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2021.

PRILL, R. **Why Measure Carbon Dioxide Inside Buildings?** Revised 2000. Washington State University Extension Energy Program. Spokane, Washington, USA. Disponível em: <https://www.energy.wsu.edu/documents/co2inbuildings.pdf>. Acessado em março de 2022.

REHVA - Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations. MUNDT, E. (ed.); MATHISEN. H.M.; NIELSEN, P.V.; MOSER, A. **Ventilation Effectiveness.** Guidebook nº 2. Brussels, 2004.

REHVA - Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations. ROMANÒ, R.; BASSO, R.A.; GINESTET, A.; ANDERSSON, J.; GUSTAVSSON J.; HYTTINEN, M.; TRONVILLE, P.; ROSSI, C. **Air Filtration in HVAC Systems.** Guidebook nº 11. Brussels, 2020.

REHVA - Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations. **Indoor Environment and Energy Efficiency in Educational Buildings - Part 1- Principles.** Guidebook nº 13. Brussels, 2021.

REHVA - Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations. GUSTAVSSON, J.; GINESTET, A.; TRONVILLE, P.; HYTTINEN, M. **Manual REHVA nº 11: Filtragem de Ar nos Sistemas de AVAC.** Lisboa, 2011.

REHVA - Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations. **Ambiente Interior e Eficiência Energética nas Escolas – 1ª parte – Princípios**. Manual nº 13. Lisboa, 2010.

REHVA - Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations. **REHVA COVID-19 guidance document. Version 4.0**. How to operate HVAC and other building service systems to prevent the spread of the coronavirus (SARS-CoV-2) disease (COVID-19) in workplaces. Brussels, 2020.

REHVA - Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations. **Existing Buildings, Building Codes, Ventilation Standards and Ventilation in Europe - The Final Report**. HealthVent. Health-Based Ventilation Guidelines for Europe. Work Package 5. Brussels, 2012.

ROLLO, A. F. **Estudo de Sistema de Ar Condicionado e Ventilação para Laboratórios**. Trabalho de conclusão de curso apresentado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

ROLLO, A. F; MARIANI, A. L. C. **Eficiência energética e qualidade do ar em laboratórios didáticos e de pesquisa**. Trabalho apresentado no XIV CONBRAVA. São Paulo, 2015.

ROLLO, A. F; MARIANI, A. L. C.; TRIGO, F.C. **Análise do Comportamento de Parâmetros da Qualidade do Ar Interior e Proposta de Correlações a Partir de Séries de Ensaio em Ambientes de Instituições Educacionais**. Trabalho apresentado no XVI CONBRAVA. São Paulo, 2019.

ROLLO, A. F; MARIANI, A. L. C.; AIKAWA, A. S.; PETRONI, R. **Avaliação Experimental de Processos de Varrição Pneumática na Presença de Poluentes no Ar Atmosférico e no Ar de Ambientes Internos**. Trabalho apresentado no XVII CONBRAVA. São Paulo, 2021.

ROLLO, A. F; MARIANI, A. L. C.; PIMENTA, M. M.; **Análise da Variação de Filtragem e da Vazão do Ar Externo sobre Parâmetros da Qualidade do Ar Interior**. Trabalho apresentado no XIII MERCOFRIO. Porto Alegre, 2022.

SAGE - Scientific Advisory Group for Emergencies. **Role of Ventilation in Controlling SARS-CoV-2 Transmission**. Environmental and Modelling Group EMG.UK, September 20, 2020. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/publications/emg-role-of-ventilation-in-controlling-sars-cov-2-transmission-30-september-2020>. Acessado em março de 2022.

SAMOLI, E.; PENG, R.; RAMSAY, T.; PIPIKOU, M.; TOULOUMI, G.; DOMINICI, F.; BURNETT, R.; COHEN, A.; KREWSKI, D.; SAMET, J.; KATSOUYANNI, K. **Acute Effects of Ambient Particulate Matter on Mortality in Europe and North America: Results from the APHENA Study.** *Environmental Health Perspectives*, v.116, Nº11, November, 2008.

SÃO PAULO. Decreto Nº 59.113, de 23 de abril de 2013. **Estabelece novos padrões de qualidade do ar e dá providências correlatas.** Governo do Estado. São Paulo, 2013.

SARANGI, B.; AGGARWAL, S. G.; SINHA, D.; GUPTA, P. K. **Aerosol effective density measurement using scanning mobility particle sizer and quartz crystal microbalance with the estimation of involved uncertainty.** *Atmospheric Measurement Techniques*, 9, 859–875, 2016.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change.** 3ª ed. Editora John Wiley & Sons, 2016.

SENSIRION, **Sensor Specification Statement - How to Understand Specifications of Sensirion Particulate Matter Sensors.** Version 1 - D1 - March 2020. Disponível em: <https://sensirion.com/>. Acessado em março de 2022.

SENSIRION, **Datasheet SEN5x - Environmental Sensor Node for HVAC and Air Quality Applications.** Version 1 - D1 - January 2022. Disponível em <https://sensirion.com/>. Acessado em março de 2022.

SEPPÄNEN, O.; FISK, W.J. **Some quantitative relations between indoor environmental quality and work performance or health.** *International Journal of HVAC&R Research*, 12(4): p. 957-973, 2006.

SHORTRIDGE, **Flow Hood Air Balance System– Instruction Manual Models CFM 83, 80 & 78** - Shortridge Instruments Inc., Scottsdale, Arizona, EUA, 1990.

SIMÕES-MOREIRA, J.R.; HERNANDEZ NETO, A. **Fundamentos e Aplicações da Psicrometria.** 2ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2019.

STEPHENS, B.; BRENNAN, T.; HARRIMAN, L. **Selecting Ventilation Air Filters to Reduce PM_{2.5} Of Outdoor Origin.** *ASHRAE Journal*, September, 2016.

STIHL -STIHL Modelo BR 800 – Manual de Instruções de Serviços. Disponível em: <https://www.stihl.com.br/>. Acessado em março de 2022.

TESTO. **Testo 535 – Instruction Manual**. Disponível em: <https://www.testo.com/pt-BR/>. Acessado em março de 2022.

TITTARELLI, A.; BORGINI, A.; BERTOLDI, M.; DE SAEGER, E.; RUPRECHT, A. STEFANONI, R.; TAGLIABUE, G.; CONTIERO, P.; CROSIGNANI, P. **Estimation of particle mass concentration in ambient air using a particle counter**. *Atmospheric Environment*, 42, 8543–8548, 2008.

TRIBESS, A. **PME 2514 – Conforto Térmico**. Apostila do curso de “Conforto Térmico”. EPUSP, São Paulo, 2012.

TRONVILLE, P.; RIVERS, R. **Air Filter Performance**. *ASHRAE Journal*, vol. 58, Nº 5, p. 14 – 25. May, 2016.

TRONVILLE, P. **Qualidade do Ar Interior – aspectos de saúde e de energia na filtração do ar**. Palestra apresentada no 3º Dia de Treinamento ABRAVA. São Paulo, 10 de Setembro de 2019.

TRONVILLE, P.; GENTILE, V.; MARVAL, J. **Guidelines for measuring and reporting particle removal efficiency in fibrous media**. *Nature Communications*, vol. 14, 5323, 2023.

TROX TECHNIK. **ISO 16890 - The new standard for coarse dust and fine dust filters**. Germany 2017. Disponível em <https://www.trox.de/en/filter-elements-and-filter-units/what-is-new-about-the-new-iso%C2%A016890%3F-08ff93085c89ca99>. Acessado em março de 2022.

TSI. **Optical particle sizer spectrometer model 3330 - Operation and service manual**. Disponível em: <https://tsi.com/>. Acessado em março de 2022.

TUCH, T.; MIRME, A.; TAMM, E.; HEINRICH, J.; HEYDER, J.; BRAND, P.; ROTH, C.; WICHMANN, H. E.; PEKKANEN, J.; KREYLING, W.G. **Comparison of two particle-size spectrometers for ambient aerosol measurements**. *Atmospheric Environment*, 34, 139–149, 2000.

VALÊNCIO, A.; HERSCHANDER, J.B.P.M. **Estudo da filtragem na qualidade do ar interno em ambientes de instituição de ensino.** Trabalho de conclusão de curso apresentado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2021.

VUOLO, J.H. **Introdução à Teoria de Erros.** Instituto de Física da Universidade de São Paulo. 3ª Edição. São Paulo, 1999.

VUOLO, J.H. **Fundamentos da Teoria de Erros.** 2ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 1996.

WARGOCKI, P.; WYON, D. P. **Research report on effects of HVAC on student performance.** *ASHRAE Journal*, 48, p. 22-28, 2006.

WARGOCKI, P.; WYON, D. P. **The effect of moderately raised classroom temperatures and classroom ventilation rate on the performance of schoolwork by children.** *HVAC&R Research*, 13(2), p. 193-220, 2007.

WARGOCKI, P.; WYON, D. P. **The effects of outdoor air supply rate and supply air filter condition in classrooms on the performance of schoolwork by children.** *HVAC&R Research*, 13(2), p. 165-191, 2007.

WARGOCKI, P.; WYON, D. P.; BAIK, Y. K.; CLAUSEN, G.; FANGER, P. O. **Perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity in an office with two different pollution loads.** *Indoor Air*, 9(3): p. 165-179, 1999.

WARGOCKI, P.; WYON, D. P.; SUNDELL, J.; CLAUSEN, G.; FANGER, P. O. **The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity.** *Indoor Air*, 10(4): p. 222-36, 2000.

WARGOCKI, P.; WYON, D. P.; SUNDELL, J.; LAGERCRANTZ, L.; WITTERSEH, T.; FANGER, P. O. **Subjective perceptions, symptom intensity, and performance: a comparison of two independent studies, both changing similarly the pollution load in an office.** *Indoor Air*, 12(2), p. 74-80, 2002.

WHEELER, A.E. **A View of IAQ as the Century Closes.** *ASHRAE Journal*, p. 35-38, Nov.1999.

WYON, D. P.; WARGOCKI, P. **Indoor Environmental Effects on the Performance of School Work by Children (1257-TRP) - Final Report.** ASHRAE- American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers.2009.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Air quality guidelines:** Global update 2005: Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. 2005.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **WHO Global Air quality guidelines:** Particulate Matter (PM_{2,5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. 2021.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Health effects of particulate matter:** Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia. Regional Office for Europe. Copenhagen, Denmark, 2013.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Asbestos: elimination of asbestos-related diseases.** February 15, 2018. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/asbestos-elimination-of-asbestos-related-diseases>. Acessado em março de 2022.

ZHAO, S.; YU, Y.; YIN, D.; HE, J. **Effective Density of Submicron Aerosol Particles in a Typical Valley City, Western China.** *Aerosol and Air Quality Research*, 17, 1–13, 2017.

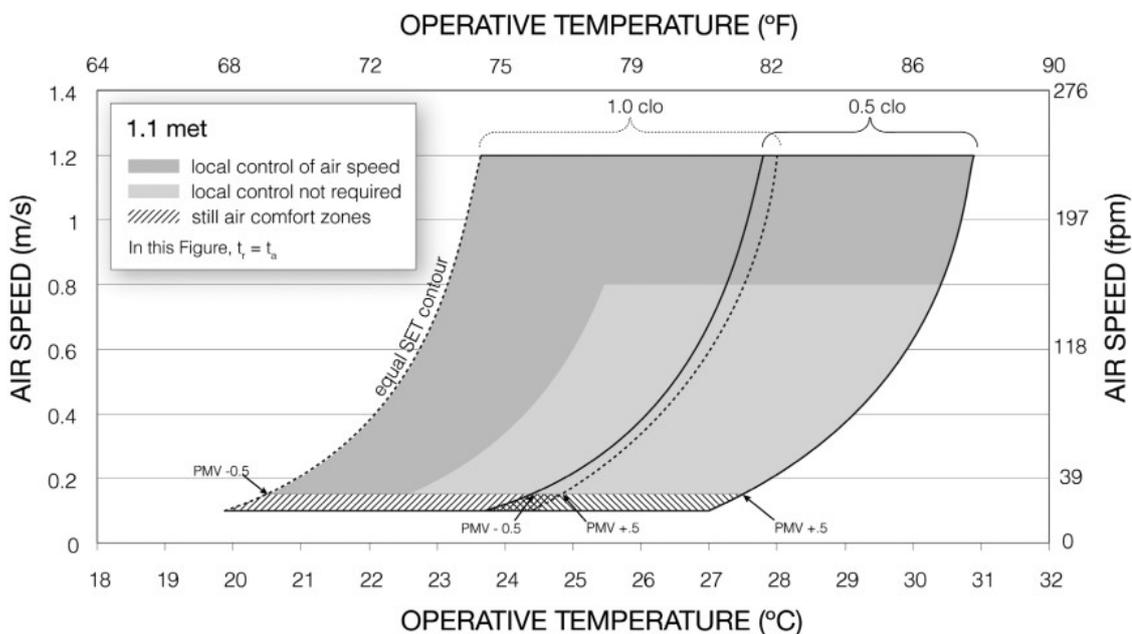
APÊNDICES

Apêndice A – Parâmetros de Conforto para Velocidade do Ar

Em relação à velocidade do ar, o Valor Máximo Recomendável (VMR) de velocidade do ar, dado pela RE-09 (ANVISA, 2003) é de até 0,25 m/s na região de influência da distribuição do ar, no nível de 1,5m sobre o piso. Já na NBR 16401-2 (ABNT, 2008), este valor de velocidade é recomendado apenas para distribuição de ar por sistema de fluxo de deslocamento, com grau de turbulência abaixo de 10% e no verão. Para sistema convencional de distribuição, com turbulência entre 30% e 50%, as velocidades máximas recomendadas por ABNT (2008) são de 0,20 m/s e 0,15 m/s para condições de verão e inverno, respectivamente.

ASHRAE (2010), por sua vez, estabelece uma faixa maior para a velocidade do ar, em função da temperatura de operação, para obtenção de conforto térmico. Essa faixa encontra-se no Gráfico Ap.A.1. Para condições de verão e inverno consideram-se vestimentas dos ocupantes de respectivamente 0,5 clo e 1,0 clo, umidade relativa baixa (10%) e atividade de 1,1 met.

Gráfico Ap.A.1: Faixa aceitável de temperatura e velocidade do ar na zona de conforto (ASHRAE, 2010).

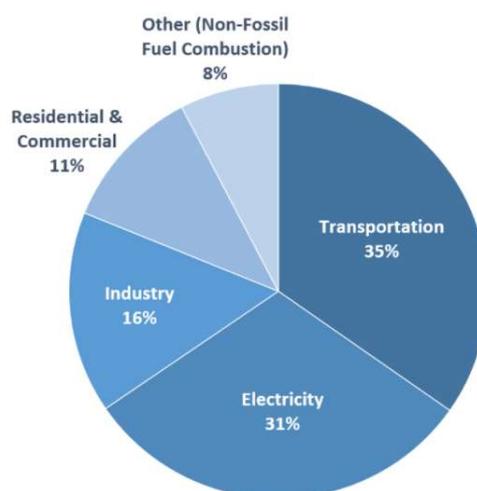


O índice PMV representa o Voto Médio Estimado (“*Predicted Mean Vote*” em inglês). Para uma análise detalhada da estimativa de PMV, em função dos valores de temperatura operativa, velocidade do ar e isolamento de vestimentas, pode-se consultar as tabelas presentes na Norma ISO 7730 (ISO, 2005).

Apêndice B – Principais Fontes de Emissão de CO₂

Atualmente o CO₂ é o principal gás de efeito estufa emitido pelas atividades humanas, representando em torno de 80% das emissões de gases estufa para a atmosfera nos Estados Unidos (EPA, 2020). No Gráfico Ap.B.1, pode-se visualizar as principais atividades que contribuíram para essas emissões.

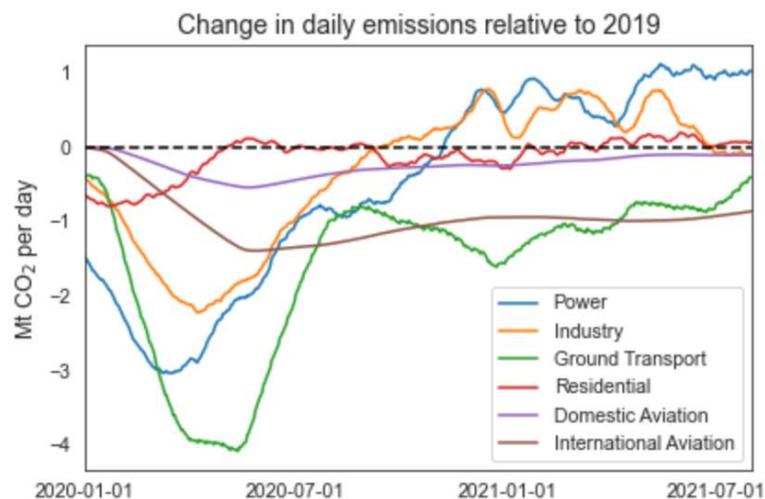
Gráfico Ap.B.1: Principais fontes de emissão de CO₂ nos EUA em 2019 por setores (EPA, 2020).



Com o advento da pandemia do Coronavírus, houve limitações de deslocamento impostas ao redor do mundo, provocando também uma diminuição do nível das atividades econômicas. Com isso, a taxa global de emissão de CO₂ apresentou uma redução neste período. Conforme pode-se visualizar no Gráfico Ap.B.2, contudo, em julho de 2021, aproximadamente um ano e meio após o início da pandemia, os níveis de emissões de muitas das atividades humanas já haviam voltado a atingir os patamares de 2019, pré-pandemia.

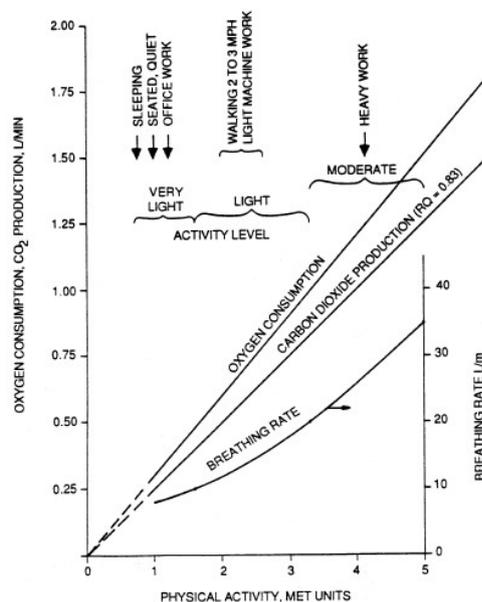
Pode-se visualizar que as emissões referentes à geração de energia e indústrias, após uma queda acentuada no primeiro trimestre de 2020, recuperaram rapidamente os níveis de emissões de 2019. Os setores de transporte e aviação, por sua vez, tiveram uma retomada mais lenta. Eles apresentam, porém, também uma tendência de alta em suas emissões.

Gráfico Ap.B.2: Variação das emissões globais diárias de CO₂ em relação à 2019 (JACKSON et al. (2022)).



Em relação aos ambientes internos, a emissão de CO₂ é devida principalmente aos ocupantes, podendo a sua taxa de produção variar também de acordo com o tipo de atividade realizada, em função da alteração do metabolismo, conforme indicado no Gráfico Ap.B.3,

Gráfico Ap.B.3: Taxa de respiração, consumo de oxigênio e produção de CO₂ em função do metabolismo (ASHRAE, 2013).

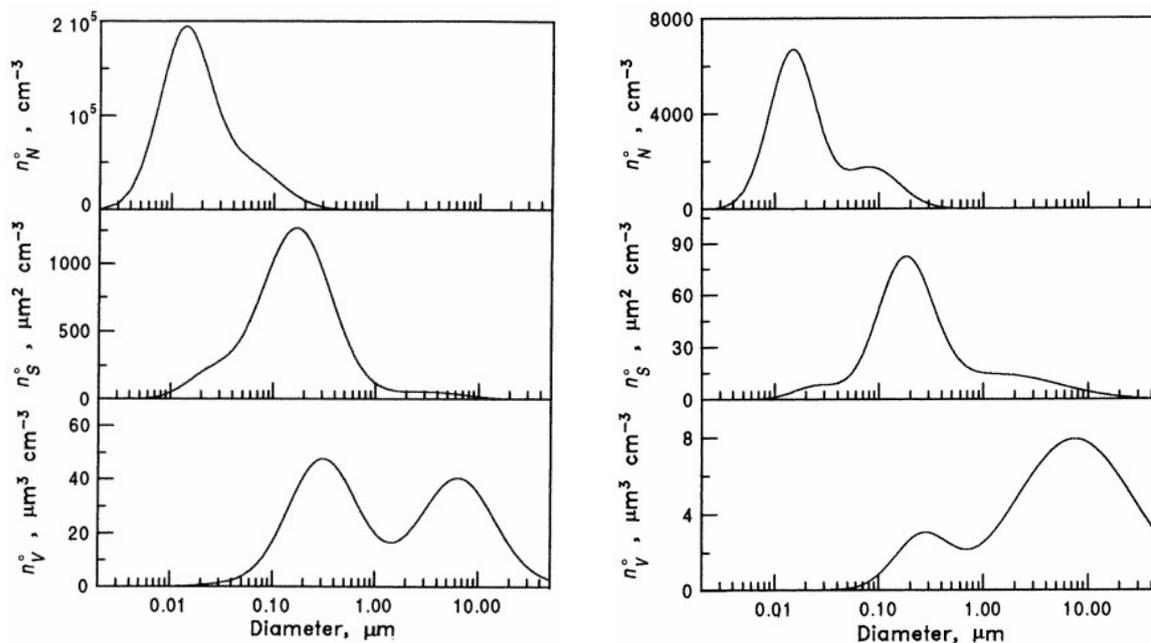


Apêndice C – Distribuição de Tamanhos de Particulados Presentes no Ar Externo

As características físicas e químicas dos componentes dos materiais particulados no ar externo podem variar conforme a localidade. Áreas urbanas, mais industrializadas e com maior fluxo de veículos, tendem a apresentar uma maior concentração de partículas finas. Em estudo desenvolvido por Kundu e Stonea (2014) em áreas urbanas e rurais no meio oeste americano, constatou-se, além disso, uma diferente composição dos particulados em cada área em função das fontes de emissões de cada local.

No Gráfico Ap.C.1, podem ser visualizadas as curvas padrão de distribuição de particulados por tamanhos para áreas urbanas (a) e áreas rurais (b), dadas por Seinfeld & Pandis (2016) e utilizadas como referência pela Norma ISO 16890 (ISO, 2016).

Gráfico Ap.C.1: Distribuição típica de número, superfície e volume de particulados para (a) áreas urbanas e (b) áreas rurais (SEINFELD & PANDIS, 2016).

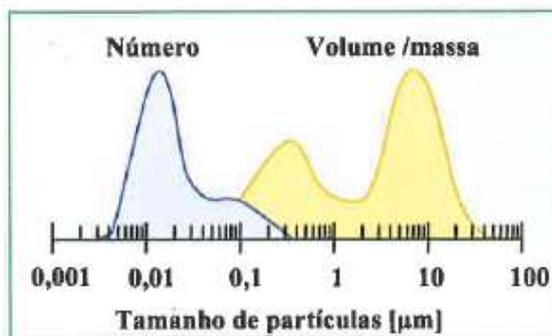


(a) áreas urbanas

(b) áreas rurais

Conforme ressaltado em REHVA (2011), deve-se atentar que a distribuição de partículas na atmosfera pode ser expressa de diferentes formas, como número total de partículas, levantadas por um contador, ou em função do volume/massa dos elementos, conforme realizado pela maioria das normas. Um exemplo ilustrativo de distribuição em função do tamanho para cada forma de expressão é apresentado na Figura Ap.C.1.

Figura Ap.C.1: Exemplo de distribuição de partículas em número e em volume/massa (REHVA, 2011).



Conforme pode ser visualizado na Figura Ap.C.1, a curva de distribuição de volume/massa tende a estar deslocada para a direita em relação à curva de número de partículas. Isso se deve à maior dimensão das partículas grossas, que tendem a contabilizar uma maior proporção no volume/massa do conjunto. Esta característica é importante para realizar a comparação dos dados obtidos por meio de diferentes métodos de medição. Por exemplo, através do contador de partículas utilizado nos ensaios experimentais desenvolvidos no presente trabalho, cujas informações técnicas são apresentadas no item 4.5.3.

Para a obtenção dos dados de concentração mássica por meio do contador de partículas, deve-se estimar um valor de massa específica. Com este valor, realiza-se a conversão do número de elementos para valores de massa, de forma a que os resultados possam ser comparados com aqueles obtidos por métodos gravimétricos, como o utilizado no estado de São Paulo pelas estações do Qualar, cujos dados encontram-se disponíveis em CETESB (2022).

Como a composição dos materiais particulados é variável e influenciada por diversos fatores, relativos às fontes de emissões e aos aspectos ambientais, a massa específica média das partículas varia conforme as condições locais e sazonais. Um método para estimar a massa específica, realizado por estudos encontrados na literatura, é o de comparar os dados monitorados através de contadores de partículas com medições gravimétricas realizadas de forma simultânea.

Zhao et al. (2017) realizaram medições ao longo de um ano, entre setembro de 2012 e agosto de 2013 em uma cidade localizada no noroeste da China, obtendo-se resultados para a massa específica média mensal dos materiais particulados presentes na atmosfera. Os valores obtidos variaram entre 1,30 e 1,60 g/ml, dependendo da época do ano. Outros aspectos que mostraram influência nos resultados foram precipitações, ventos fortes e queimadas, os quais tenderam a alterar os valores de massa específica monitorados.

Tuch et al. (2000), por sua vez, realizaram medições durante um período de seis semanas, na primavera de 1996, na cidade de Erfurt, na Alemanha. Nessas medições, foram utilizados dois modelos distintos de espectrômetros para realizar a contagem das partículas, chegando-se aos valores de massa específica média respectivamente de 1,53 e 1,69 g/ml. Outros estudos acerca da distribuição e da determinação da massa específica dos particulados, através de medições com contadores de partículas, podem ser verificados em Saranji et al. (2016) e Tittarelli et al. (2008).

Na Tabela Ap.C.1, retirada de Zhao et al. (2017), são apresentados os resultados de estudos realizados ao redor do mundo para a determinação da massa específica dos particulados, com o detalhamento do tipo de instrumentação utilizada em cada caso.

Tabela Ap.C.1: Valores de massa específica média dos particulados obtidos em estudos ao redor do mundo (ZHAO et al., 2017).

$\rho/g\text{ cm}^{-3}$	Size ranges/nm	Sampling environments (Season)	Instruments*	References
1.2–1.8	< 1000 nm	Ambient air particles (summer)	SMPS + TEOM	Morawska <i>et al.</i> , 1999
1.54–1.77	~100–300 nm	Urban Atlanta, U.S. (summer)	DMA-APM	McMurry <i>et al.</i> , 2002
0.3–1.2	< 1000 nm	Diesel Exhaust Particles	DMA-APM	Park <i>et al.</i> , 2003
0.3–1.2	30–300 nm	Diesel Exhaust Particles	DMA-ELPI	Maricq and Xu, 2004
1.56 ± 0.12	50–20000 nm	A park, Texas, U.S. (summer and fall)	DMA + OPC + APS	Hand and Kreidenweis, 2002
0.4–1.1	50–300 nm	Particles from a light-duty diesel vehicle	DMA-CPMA	Olfert <i>et al.</i> , 2007
1.62 ± 0.29	500–800 nm	Campus, Munich, Germany (summer)	DMA + APS	Karg, 2000
1.05–2.36	< 2500 nm	Urban Air in Augsburg, Germany (four seasons)	TDMPS-APS + TEOM	Pitz <i>et al.</i> , 2008a
1.50 ± 0.30	540–800 nm	Urban Northeastern U.S. (summer)	SMPS-APS + TEOM	Khlystov <i>et al.</i> , 2004
1.0–1.5	< 1000 nm	Riverside, California, U.S. (summer)	DMA-ATOFMS	Spencer <i>et al.</i> , 2007
1.36–1.55	50–400 nm	Urban, Shanghai, China (winter)	TDMA-APM	Yin <i>et al.</i> , 2015

* “-” and “+” stand for the instruments were used in serial and in parallel, respectively.

Apêndice D – Influência da QAI sobre o Desempenho dos Ocupantes

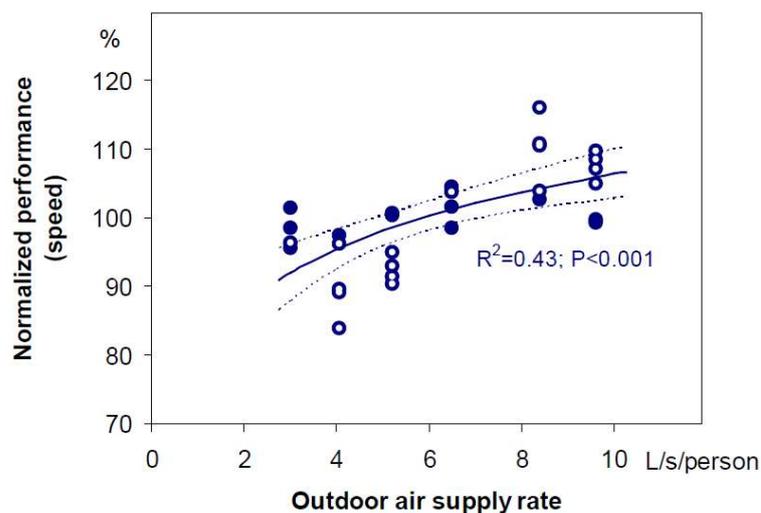
Foram verificados na literatura diversos trabalhos desenvolvidos ao longo dos últimos anos que realizam o estudo da relação existente entre o desempenho dos ocupantes e a qualidade do ar interno de um dado ambiente, representada, em muitos casos, pela vazão de renovação de ar utilizada. Neste item, serão apresentados os métodos adotados e os resultados obtidos em alguns destes trabalhos. O foco principal será em levantamentos desenvolvidos em ambientes de ensino.

O projeto de pesquisa RP-1257, apoiado pela ASHRAE, desenvolveu uma série de estudos, com medições realizadas em 5 escolas na Dinamarca, envolvendo mais de 300 alunos com idades na faixa entre 10 e 12 anos. O relatório final está disponível em Wyon e Wargocki (2009). Para o controle da temperatura e da vazão de ar externo, as salas foram dotadas de equipamentos de condicionamento de ar do tipo “split” e caixas de ventilação com filtragem para a renovação de ar, configuração essa similar à empregada na Sala de Aula A2 da EPUSP estudada no presente trabalho, cujas informações são detalhadas no item 4.3.1.

Ao longo dos experimentos, foram monitorados continuamente os valores dos parâmetros psicrométricos e da concentração de dióxido de carbono (CO₂) no ar interior das salas. Foram ainda monitorados a vazão de renovação de ar, as condições de ocupação e o uso das janelas do ambiente. O desempenho dos estudantes foi avaliado através de três critérios: habilidades cognitivas, tarefas escolares típicas e testes padronizados.

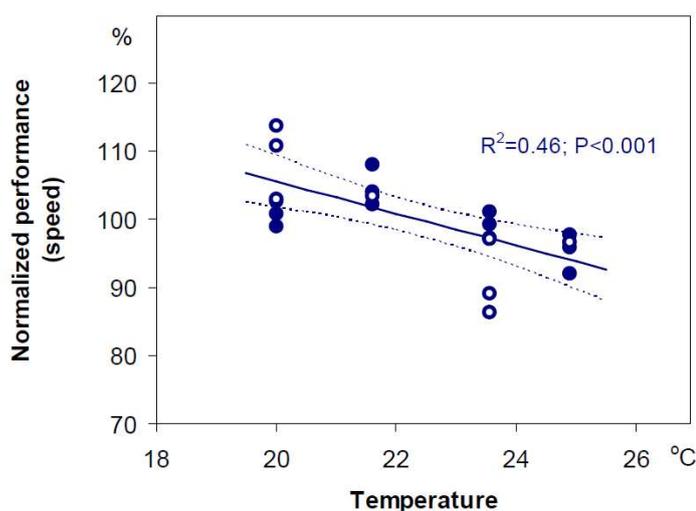
Os resultados obtidos pelo projeto de pesquisa, conforme detalhados em Wyon e Wargocki (2009) e ressaltados em Olesen (2015), apontaram uma elevação de aproximadamente 14,5% no desempenho dos estudantes ao se dobrar a taxa de renovação de ar utilizada nos ambientes, conforme curva apresentada no Gráfico Ap.D.1. Obteve-se também uma menor taxa de abstenção entre os estudantes referente a doenças respiratórias.

Gráfico Ap.D.1: Desempenho dos estudantes em função da vazão de ar externo (WYON e WARGOCKI, 2009)



Neste projeto de pesquisa, concluiu-se, ainda, que a disponibilidade apenas de janelas nas salas de aula não garantiu um bom nível de qualidade do ar interior nos ambientes. Isso se deve principalmente à dificuldade dos professores e alunos de perceberem quando o ar estava em más condições e de atuarem para melhorá-la (WYON e WARGOCKI, 2009). Quanto à temperatura (TBS), os resultados apontaram que, durante épocas com temperaturas altas, cada redução de temperatura da sala de 1°C levou a um acréscimo de desempenho dos estudantes da ordem de 2% a 4%, conforme curva apresentada no Gráfico Ap.D.2.

Gráfico Ap.D.2: Desempenho dos estudantes em função da temperatura (WYON e WARGOCKI, 2009)



Um outro estudo realizado para analisar o desempenho dos estudantes em função da taxa de renovação foi desenvolvido por Bakó-Biró et al. (2011), envolvendo mais de 200 alunos com idades entre 9 e 10 anos, em 8 escolas primárias na Inglaterra. Intervenções foram realizadas

no sistema de ventilação de ar externo das salas de forma a ampliar a taxa de renovação de ar média, que se encontrava na faixa de 1,0 l/s/pessoa para 8,0 l/s/pessoa. Como referência, este valor é próximo à taxa mínima estipulada no Brasil pela Resolução RE-09 (ANVISA, 2003) de 27 m³/h/pessoa (7,5 l/s/pessoa) apresentada no Item 3.5.1.

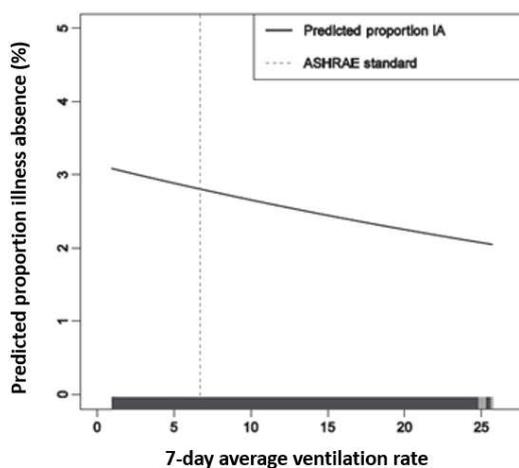
O desempenho dos estudantes foi avaliado neste estudo através de atividades que requeriam diferentes tipos de habilidades dos alunos. Foram obtidas melhoras nos resultados dos alunos com o aumento da taxa de renovação de ar, da ordem de 2,2% para tempo de reação, 2,7% para vigilância, 8% para memória e 15% para reconhecimento de palavras. De uma forma geral, o estudo encontrou fortes evidências de que uma baixa taxa de renovação de ar em salas de aulas reduz a atenção e a vigilância dos alunos, além de afetar negativamente a memória e a concentração (BAKÓ-BIRÓ et al., 2011).

Haverinen-Shaughnessy et al. (2015), por sua vez, conduziram um estudo em um total de 70 escolas primárias e 27 escolas secundárias localizadas no sudoeste dos Estados Unidos. Os resultados em testes aplicados de matemática e de leitura foram utilizados como parâmetro para mensurar o desempenho dos estudantes. Neste estudo foi verificada uma associação significativa entre os resultados obtidos nas provas e as taxas de renovação de ar utilizadas nas salas. Os fatores de correlação para matemática e leitura foram de $r = 0,419$ e $r = 0,479$, respectivamente. Foram verificadas, ainda, influências sobre a saúde dos estudantes.

Uma análise crítica, envolvendo um compilado de trabalhos presentes na literatura acerca da influência dos poluentes internos e das condições térmicas nas escolas sobre o desempenho dos alunos, pode ser verificada em Mendell e Heath (2004). Uma série de resultados obtidos em outros estudos realizados sobre o tema podem, ainda, ser visualizados em Olesen (2005) e REHVA (2006), com destaque para influência da qualidade do ar interior sobre o desempenho e sobre a taxa de absenteísmo dos ocupantes.

Em relação a esse tema do absenteísmo, Mendell et al. (2013) desenvolveram um estudo com alunos de 3^a a 5^a série, em 162 salas de aulas distribuídas em 28 escolas nos Estados Unidos. Neste estudo foi avaliada a relação entre as faltas dos alunos por doenças e as taxas de renovação utilizadas nos ambientes. O monitoramento foi realizado pelo período de dois anos letivos. Os resultados obtidos apontaram uma relação entre o aumento da renovação do ar e a redução da taxa de absenteísmo por doenças dos estudantes, conforme presente no Gráfico Ap.D.3. Foi, ainda, apresentado neste estudo uma estimativa do custo induzido pelo aumento de problemas de saúde e ausência dos alunos devido à baixa qualidade do ar.

Gráfico Ap.D.3: Absenteísmo dos estudantes em função da vazão de ar externo (MENDELL et al., 2013)



Outros resultados obtidos acerca da relação entre a saúde dos ocupantes, relativa à Síndrome do Edifício Doente (SED), podem ser verificados em estudos desenvolvidos por Seppänen e Fisk (2006) e Fisk et al. (2009). Em Carrer et al. (2018) pode ser visualizado um resumo dos resultados obtidos através do projeto Healthvent (REHVA, 2012), desenvolvido na Europa com objetivo de desenvolver programas de saúde e diretrizes de ventilação e, por meio desse processo, contribuir para o avanço das políticas de qualidade do ar interno (QAI) e produzir guias de orientações sobre o tema.

Apêndice E – Modelagem de um Ambiente

Em posse dos dados construtivos e operacionais do sistema de condicionamento de ar e de ventilação de um dado ambiente, além das suas interações com os ambientes contíguos e com o ar exterior, pode-se desenvolver modelos físicos e equacionamentos matemáticos para a previsão do comportamento da concentração de contaminantes no ar interior.

Diversos elementos devem ser considerados no desenvolvimento destes modelos, tais como: taxas de renovação e de recirculação de ar utilizadas; eficiência de filtragem dos elementos empregados nas tomadas de ar externo e equipamentos de ar condicionado; taxas de produção interna de contaminantes pelos ocupantes mobiliários e atividades desenvolvidas no local; taxas de deposição e ressuspensão de partículas; infiltração de ar; alterações físicas e químicas dos elementos no interior do ambiente, dentre outros fatores.

Alguns destes elementos citados, porém, como taxas de produção interna e taxas de deposição e ressuspensão de partículas, são de difícil determinação. Em geral, são empregadas hipóteses simplificadoras ou valores de referências obtidos na literatura para a previsão de seus efeitos. Em relação à eficiência de filtragem, por sua vez, as informações disponibilizadas pelo novo método de testagem proposto pela Norma ISO 16890-1 (ISO, 2016) trouxeram um importante subsídio para o desenvolvimento de cálculos mais apurados, ao classificar os filtros com base em suas eficiências para diferentes tamanhos de particulados presentes na atmosfera (PM₁₀, PM_{2,5} e PM₁).

Para um dado tamanho de particulado, sua concentração no ar insuflado no ambiente (SUP – *Supply Air*) pode ser estimada em função de sua concentração no ar exterior (ODA – *Outdoor Air*) e da eficiência do elemento filtrante, com base na Equação (1). Caso se utilize uma bateria de filtros em série, a sua eficiência combinada pode ser obtida pela Equação (3.2).

$$c_{SUP} = (1 - E_t) * c_{ODA} \quad (1)$$

Para o cálculo da variação da concentração de contaminantes no interior do ambiente (IDA – *Indoor Air*), Hoffmann (2015) apresenta uma relação simplificada, apresentada na Equação (2) a seguir, adaptando-se a nomenclatura dos termos. Q_{SUP} é a vazão de insuflamento, \dot{m}_{GER} é a taxa de geração interna de contaminantes e V é o volume de ar do ambiente. Esta fórmula deriva-se da equação da continuidade para um volume de controle e considera a concentração

no ar externo como constante num dado intervalo de tempo. São desprezados os efeitos de alguns fatores, como: deposição e ressuspensão de partículas; infiltração de ar por elementos construtivos; alterações de propriedades dos contaminantes no interior do ambiente.

$$c_{IDA}(t) = \left(\frac{\dot{m}_{GER}}{Q_{SUP}} + c_{SUP} \right) * \left(1 - e^{-\frac{Q_{SUP}*t}{V}} \right) + c_{IDA}(t_0) * e^{-\frac{Q_{SUP}*t}{V}} \quad (2)$$

O conceito de eficiência de ventilação na zona de ocupação (ε_V), introduzido anteriormente na Equação (3.4), é definido pela Norma EN 13779 (CEN, 2011) através da Equação (3), com base no ar extraído do ambiente (ETA – Extract Air). Introduzindo-o na formulação, chega-se à Equação (4). Ela contabiliza os efeitos do sistema de distribuição do ar na sala sobre o nível de contaminantes, conforme Tronville (2019), com ajustes nas nomenclaturas utilizadas.

$$\varepsilon_V = \frac{c_{ETA} - c_{ODA}}{c_{IDA} - c_{ODA}} \quad (3)$$

$$c_{IDA}(t) = \left(\frac{\dot{m}_{GER}}{\varepsilon_V * Q_{SUP}} + c_{SUP} \right) * \left(1 - e^{-\frac{\varepsilon_V * Q_{SUP} * t}{V}} \right) + c_{IDA}(t_0) * e^{-\frac{\varepsilon_V * Q_{SUP} * t}{V}} \quad (4)$$

Para o caso em regime permanente, em que as condições de concentração de contaminantes se estabilizaram no interior do ambiente estudado, a concentração no ambiente interno (c_{IDA}) pode ser obtida pela Equação (5), derivada da Equação (4) com o tempo tendendo ao infinito. Estas condições de equilíbrio podem, porém, não ser obtidas no interior de um dado ambiente durante o seu período de ocupação, em função de diversos fatores, como: variação do número de ocupantes e da taxa de geração interna de contaminantes (\dot{m}_{GER}); variações das condições de contaminantes no ambiente externo e no ar insuflado (c_{SUP}).

$$c_{IDA} = \frac{\dot{m}_{GER}}{\varepsilon_V * Q_{SUP}} + c_{SUP} \quad (5)$$

Uma modelagem física detalhada do ambiente estudado no presente trabalho, da Sala de Aula A2 do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP, foi realizada por Guilhotti (2021). Este modelo contempla os principais parâmetros construtivos e do sistema de climatização e renovação de ar presentes na sala, detalhados no item 4.3.1. O volume de controle para o qual foi aplicada a equação da continuidade pode ser visualizado na Figura Ap.E.1.

A Equação (6) apresenta a formulação geral obtida para a concentração de contaminantes no interior da sala, adaptada de Guilhotti (2021). Nela são incluídos, em relação à Equação (1), fatores como velocidade de deposição (V_D) e vazão de resuspensão (\dot{m}_{RES}) de partículas. São consideradas, ainda, a vazão (\dot{m}_{RCA}) e a eficiência de filtragem (E_{RCA}) dos condicionadores de ar de recirculação (RCA – *Recirculation Air*) e a massa específica do ar nos ambientes interno (ρ) e externo (ρ_{AE}), calculada a partir das suas condições psicrométricas.

Figura Ap.E.1. Modelagem da Sala A2 para cálculo da concentração de particulados (Guilhotti, 2021).



$$c_{IDA}(t) = \left[\frac{c_{SUP} * \dot{m}_{SUP} + \rho * (\dot{m}_{GER} + \dot{m}_{RES})}{a} \right] * \left(1 - e^{-\frac{a*t}{\rho*V}} \right) + c_{IDA}(t_0) * e^{-\frac{a*t}{\rho*V}} \quad (6)$$

Onde: $a = \dot{m}_{SUP} + \dot{m}_{RCA} * E_{RCA} + \rho * V_D * A$

Para a condição de regime permanente, em que as condições referentes aos diversos fatores atuantes estão em equilíbrio no interior do ambiente, a Equação (6) pode ser simplificada para a Equação (7), ao se fazer o tempo tender ao infinito.

$$c_{IDA} = \frac{\rho_{AE} * Q_{SUP} * c_{SUP} + \rho * (\dot{m}_{GER} + \dot{m}_{RES})}{\rho_{AE} * Q_{SUP} + \rho * (Q_{RCA} * E_{RCA} + V_D * A)} \quad (7)$$

Para um caso específico em que as taxas de deposição e de resuspensão de partículas sejam desprezíveis ($V_D = 0$ e $\dot{m}_{RES} = 0$) e que a eficiência de filtragem dos elementos utilizados nos condicionadores de ar de recirculação seja insignificante para o dado tamanho de particulado estudado ($E_{RCA} = 0$), a Equação (7) pode ser simplificada para a Equação (5) apresentada anteriormente. Considerando-se, ainda, que as massas específicas do ar interno e do ar externo sejam próximas e uma eficiência de ventilação unitária na zona de ocupação, dada pela Norma NBR 16.401-3 (ABNT, 2008) para sistemas com insuflamento de ar pelo teto.

Apêndice F – Ambientes LEQAI – Salas MT-16 e MT-06

Os ambientes que compõem o LEQAI (Laboratório de Estudos da Qualidade do Ar Interior) são a Sala MT-16 – Laboratório de Instrumentação e a Sala MT-06 – Laboratório de Túneis de Vento. Ambas estão localizadas nas dependências do prédio da Engenharia Mecânica da EPUSP. As dimensões e as características de envoltória destes ambientes são detalhadas na Tabela Ap.F.1.

Tabela Ap.F.1: Características físicas das Salas MT-16 e MT-06 do LEQAI.

Características – Sala MT-16		
Sala:	MT-16	MT-06
Aplicação:	Laboratório de Instrumentação	Laboratório de Túneis de Vento
Formato:	Retangular	Retangular
Comprimento:	11,8 m	15,0 m
Largura:	8,6 m	8,6 m
Área de Piso:	101,5 m ²	129 m ²
Pé direito:	4,05 m	4,05 m
Volume da sala:	411 m ³	522 m ³
Paredes:	Alvenaria	Alvenaria
Cobertura	Laje Concreto	Laje Concreto

A climatização prevista para as áreas do LEQAI é realizada através de sistema de expansão indireta, com o emprego de duas unidades resfriadoras de líquido (“*chillers*”) de condensação a ar. O fluxo de água entre os chillers e os condicionadores de ar, do tipo “*fancoils*”, instalados nas casas de máquinas de cada sala, será promovido através de bombas centrífugas. O sistema de água “gelada” prevê uma bomba dedicada a cada *chiller* e uma terceira unidade, como reserva.

Os condicionadores de ar “*fancoils*” que atendem a cada sala serão dotados de válvulas de controle do tipo 3 vias, com atuador elétrico proporcional, que modulam a entrada de água gelada na serpentina dos equipamentos conforme a temperatura do ar no interior da sala. O sistema de automação realizará a comparação em relação ao “*set-point*” de temperatura, não havendo um controle dedicado da umidade nos ambientes.

As casas de máquinas projetadas para comportar os novos equipamentos serão interligadas aos ambientes climatizados através de redes de dutos de insuflamento e retorno de ar. A sala MT-

16 terá um sistema de exaustão localizada para área de soldagem existente no interior do ambiente. Esse sistema é atendido por um exaustor do tipo centrífugo, conectado ao ponto de captação por meio de uma rede de dutos. Quando o sistema de exaustão localizada estiver em operação, o sistema de controle da climatização deverá modular os atuadores das caixas VAVs, localizadas no duto de retorno e na tomada de ar externo da casa de máquinas, buscando manter a pressão constante no interior da sala.

O sistema de climatização da Sala MT-06 – Laboratório de Túneis de Vento será dotado, ainda, de um ciclo-economizador. Este sistema será composto por um ventilador centrífugo, instalado na tomada de ar externo da casa de máquinas, e por um conjunto de “*dampers*” de regulagem e caixas VAVs, posicionados nas linhas de retorno, exaustão e tomada de ar. O sistema de automação previsto irá modular os atuadores dos elementos em função dos dados psicrométricos do ar externo, coletados em tempo real por um transmissor de temperatura e umidade relativa. Com estes dados, o controlador calcula a entalpia do ar externo num dado momento e faz a comparação com a entalpia das condições de projeto do ambiente.

Caso a condição do ar externo esteja adequada, o controlador do sistema ciclo-economizador promove o insuflamento de ar externo no ambiente, modulando a vazão conforme diferencial de entalpia calculado. Reduz-se, desta forma, a carga térmica a ser combatida pelo sistema de refrigeração, diminuindo o consumo energético nos condicionadores de ar e nos compressores das unidades de resfriamento (“*chillers*”).

Quanto ao sistema de tratamento de ar, as instalações projetadas do LEQAI proporcionarão uma ampla gama de oportunidades para estudo sobre a filtragem e suas implicações sobre os parâmetros da qualidade do ar no interior do ambiente. As tomadas de ar externo e as redes de dutos de retorno de cada sala serão dotadas de caixas de filtragem especiais. Essas caixas permitirão a instalação de diversas combinações de filtros (grossos, médios e finos), com dois estágios, podendo variar das classes G3 a F9.

No interior dos ambientes condicionados e em pontos estratégicos das redes de dutos de ar externo, insuflamento e retorno, encontra-se prevista a instalação de instrumentos para o monitoramento contínuo dos parâmetros psicrométricos e da qualidade do ar em diversos pontos do sistema de climatização e ventilação implementado no laboratório. Isso viabilizará à equipe de pesquisadores do LEQAI uma ampla gama de estudos e análises.

Na Figura Ap.F.1e na Figura Ap.F.2, são apresentados os fluxogramas básicos previstos para o sistema de climatização das Salas MT-16 e MT-06, respectivamente.

Figura Ap.F.1: Fluxograma básico previsto para o sistema de climatização da Sala MT-16 do LEQAI (GUILHOTTI, 2021)

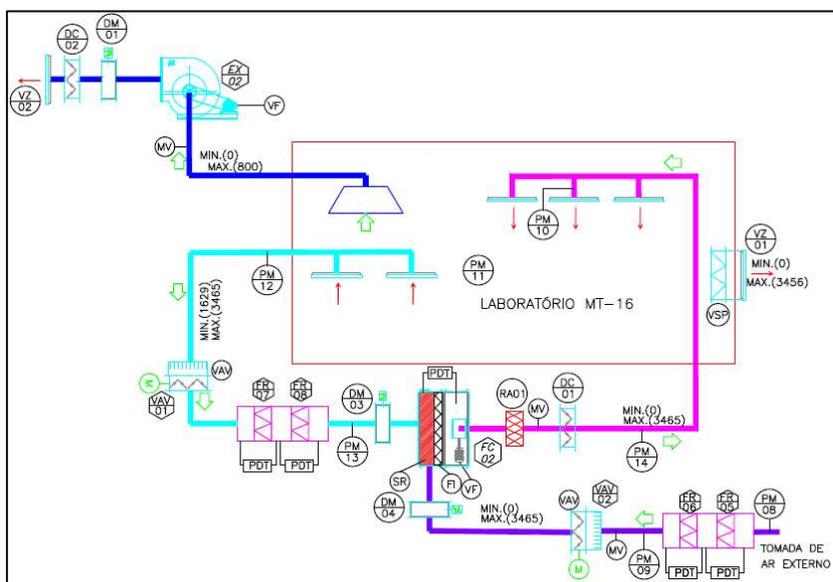
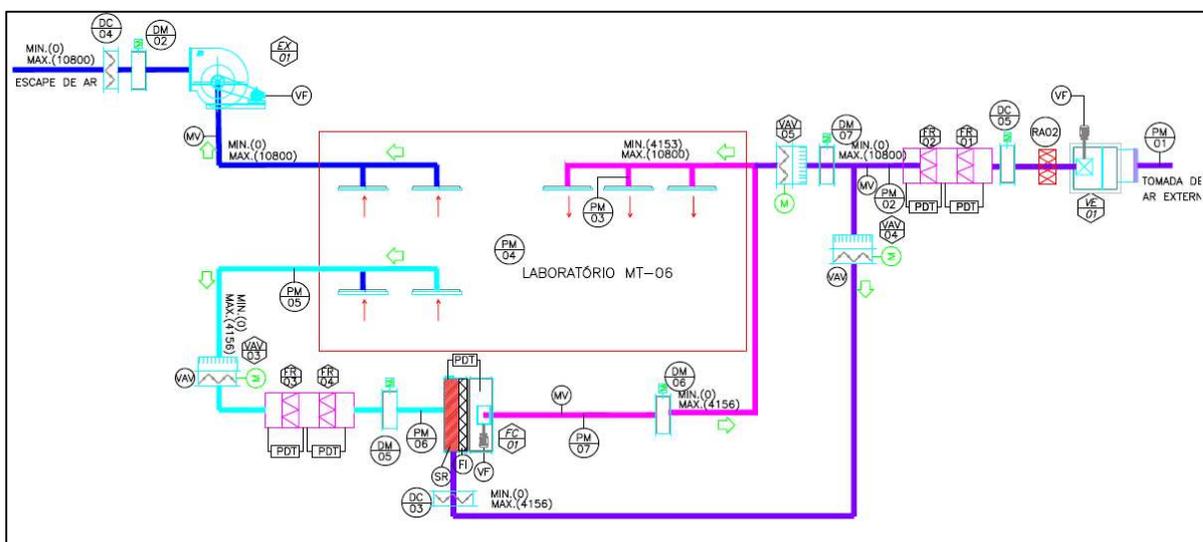


Figura Ap.F.2: Fluxograma básico previsto para o sistema de climatização da Sala MT-06 do LEQAI (GUILHOTTI, 2021)



As instalações do sistema de climatização dos laboratórios do LEQAI encontram-se em fase de execução. Foram já concluídos os serviços de obras civis referentes à construção das casas de máquinas e realizadas as aberturas nas paredes para a passagem dos dutos. Nas Figuras Ap.F.3 e Ap.F.4 podem ser visualizadas fotos da etapa de construção e da finalização das casas de máquinas, dedicadas à Sala MT-16, elaborada em painéis metálicos, e à Sala MT-06, construída em alvenaria.

Figura Ap.F.3: Fotos da casa de máquinas da Sala MT-16.



Figura Ap.F.4: Fotos da casa de máquinas da Sala MT-06.



Apêndice G – Correção de Medições de Vazão de Ar Externo

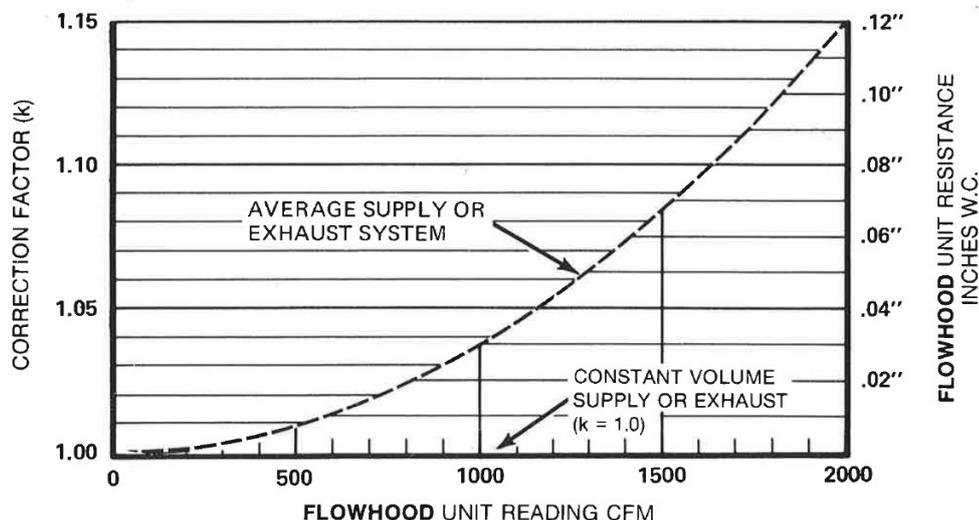
A calibração do instrumento empregado nas medições de vazões de ar externo, tipo coifa, descrito no Item 4.5.5, foi realizada para as condições de referência de pressão barométrica e temperatura informadas na Tabela 4.12. O emprego do equipamento em condições ambientais diversas dessa referência requer uma correção dos valores lidos na escala. Essa correção pode ser realizada pela Equação (1), adaptada de Shortridge (1990), onde Q_{corr} é a vazão corrigida:

$$Q_{corr} = k_{pc} * Q_{lido} * \sqrt{\frac{P_{ref}}{P_{local}} * \frac{T_{local}}{T_{ref}}} \quad (1)$$

Além da correção pelas condições atmosféricas, deve-se também realizar a correção do valor lido em função da perda de carga incrementada na linha pelo instrumento. Essa perda tende a provocar uma redução no valor lido nas escadas, em função do deslocamento do ponto de operação do ventilador em sua curva, devido à mudança na resistência do sistema. O fator de correção k foi introduzido na Equação (1) devido a este efeito e seu valor pode ser obtido no Gráfico Ap.G.1, em função da vazão de ar.

Para o caso de sistema com caixas de volume de vazão constante, com controle de pressão, esse ajuste seria desnecessário, como pode ser visualizado na curva horizontal, com fator de correção $k=1,0$. Instrumentos digitais mais modernos do tipo coifa possuem medições integradas ao equipamento para o diferencial de pressão e para a temperatura do fluxo. Isso os permite realizar automaticamente as compensações necessárias, dispensando a utilização de fatores de correção.

Gráfico Ap.G.1: Fator de correção da vazão pela perda de carga do instrumento (SHORTRIDGE, 1990).



Em posse dos valores de vazão volumétrica medidos durante os ensaios, após aplicados os devidos fatores de correção apresentados, podemos calcular a vazão mássica de ar externo que é insuflado no ambiente condicionado. O cálculo é efetuado somando-se a vazão volumétrica medida nos difusores em operação e multiplicando pela massa específica do ar externo insuflado, conforme Equação (2), na qual Q_i são as vazões individuais medidas nos difusores.

$$\dot{m}_{AE} = \rho_{AE} * \sum_{i=1}^4 Q_i \quad (2)$$

Com a utilização das equações da psicrometria, apresentadas em Bollinger e Mariani (2016), o valor da massa específica do ar externo pode ser calculado a partir dos parâmetros medidos durante os experimentos, de temperatura de bulbo seco (TBS) e umidade relativa (UR). Para isso, são utilizados também dados de pressão barométrica (P) no horário dos ensaios. Esses dados podem ser obtidos nas tabelas horárias disponibilizadas pelas estações meteorológicas da CETESB, disponíveis em CETESB (2022).

Para a realização dos cálculos, cabe-se lembrar o conceito de umidade relativa. Conforme Moreira e Hernandez (2019), ela é dada pela razão entre a pressão parcial do vapor de água na mistura e a pressão parcial que o vapor de água teria se a mistura fosse saturada à mesma temperatura e pressão total. Dessa forma, ela pode ser representada pela Equação (3):

$$UR = \frac{P_v}{P_v(TBS)} \quad (3)$$

Considerando que o ar seco e o vapor de água comportam-se na mistura como gases perfeitos, a expressão para o cálculo da massa específica pode ser obtida utilizando-se a equação dos gases perfeitos (Equação de Clapeyron) para o ar seco, conforme a Equação (4):

$$\rho = \frac{P_{ar}}{R_{ar} * T} = \frac{P - P_v}{R_{ar} * T} \quad (4)$$

Substituindo-se a definição da umidade relativa, dada na Equação (4.3), e ajustando-se a escala da temperatura (TBS), medida em graus Celsius ao longo dos ensaios, chega-se à Equação (5) para a massa específica do ar. Ela pode ser empregada na Equação (2) para o cálculo da vazão mássica de ar externo fornecido pelas caixas de ventilação.

$$\rho = \frac{P - [UR * P_v(TBS)]}{R_{ar} * (TBS + 273,15)} \quad (5)$$

A pressão de vapor em função da temperatura, para faixa compreendida de 0 a 50°C, pode ser calculada através da Equação (6), retirada de Bolliger e Mariani (2016). Essa expressão foi determinada pelo Eng. Raul Bolliger através de regressão polinomial, utilizando-se o método dos mínimos quadrados aplicados a valores obtidos na tabela de vapor saturado do manual Handbook of Fundamentals da ASHRAE.

$$P_v = \sum_{i=0}^6 C_i * T^i \quad (6)$$

Onde: $C_0 = 0,611217421$; $C_1 = 0,0444268992$; $C_2 = 1,42440863 \text{ E-}03$; $C_3 = 2,70506969 \text{ E-}05$; $C_4 = 2,77940283 \text{ E-}07$; $C_5 = 2,6287086 \text{ E-}09$; $C_6 = 1,07210619 \text{ E-}12$.

Apêndice H – Detalhamento da Análise de Incertezas

Para a determinação das incertezas referentes aos valores das grandezas obtidos nas medições realizadas durante os ensaios experimentais, utilizou-se como base o “Guia para Expressão de Incerteza de Medição”, disponível em INMETRO (2008). Este guia foi desenvolvido pelo INMETRO com base no GUM (“*Guide to Expression of Uncertainty in Measurement*”), cuja versão reeditada pode ser acessada em ISO/IEC (2008).

Conforme definição dada em INMETRO (2008), o conceito de incerteza é caracterizado como um parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando. A incerteza padrão, por sua vez, é definida como a incerteza do resultado de uma medição expressa como um desvio-padrão, podendo ser avaliada através de dois métodos, reproduzidos de INMETRO (2008):

- Avaliação tipo A: método de avaliação de incerteza pela análise estatística de séries de observações;
- Incertezas tipo B: método de avaliação de incerteza por outros meios, que não a análise estatística de séries de observações.

Como as condições das variáveis no interior do ambiente ao longo dos eventos monitorados são dinâmicas, podendo, por exemplo, variar o número de ocupantes ou o tipo de atividade realizada, fatores que influenciam sobre os valores dos parâmetros monitorados, o método mais apropriado para a avaliação das incertezas das medições realizadas nos ensaios é do tipo B. Conforme detalhado por Vuolo (1999), além de erros estatísticos, diversos tipos de erros sistemáticos, relativos ao tipo B, podem estar envolvidos em experimentos, tais como:

- **Instrumentais:** referentes à calibração dos instrumentos utilizados e às condições em que essa calibração foi realizada;
- **Teóricos:** referentes a simplificações teóricas e aproximações usadas para constantes físicas ao longo dos cálculos e modelos desenvolvidos;
- **Ambientais:** devido a efeitos que possam ser causados pelas condições ambientes do local dos ensaios sobre os parâmetros sendo monitorados;
- **Observacionais:** devido às limitações do observador ou do display do equipamento, por exemplo na leitura de escalas em equipamentos analógicos;

- **Residuais:** variabilidade dos valores que se mantêm após identificados os efeitos dos demais fatores contribuintes.

As exatidões dos instrumentos de medição empregados para o monitoramento dos parâmetros da qualidade do ar durante os experimentos foram apresentadas ao longo do item 4.5. Para os dados de exatidão informados pelos fabricantes, com os instrumentos devidamente calibrados, considerou-se a hipótese de uma distribuição Gaussiana de erros, com um nível da confiança de 95%, que representa um fator de abrangência $k=1,96$. Dessa forma, com essa premissa adotada, a incerteza padrão (u_B) para estes casos é próxima da metade do valor da exatidão, representando um nível da confiança de 68,3% que os valores estejam dentro do intervalo apresentado na Equação (1). “ Y ” representa o valor verdadeiro da grandeza, em geral desconhecido, e “ y ” o valor experimental.

$$y - u_B < Y < y + u_B \quad (1)$$

A incerteza expandida (U_B), por sua vez, conforme definição dada por INMETRO (2008), pode ser interpretada como definindo um intervalo em torno do resultado de medição que abrange uma extensa fração “ p ” da distribuição de probabilidade, caracterizada por aquele resultado e sua incerteza-padrão combinada. Este “ p ” é a probabilidade de abrangência ou o nível da confiança do intervalo. Obtém-se seu valor multiplicando-se a incerteza padrão pelo fator de abrangência k , conforme Equação (2).

$$U_B = k * u_B \quad (2)$$

Dessa forma, obtém-se o intervalo representado na equação (3), para a definição da grandeza com a incerteza expandida, com o fator k determinado em função do nível da confiança.

$$y - U_B < Y < y + U_B \quad (3)$$

Para as incertezas apontadas para as medições realizadas no presente trabalho, será utilizada a incerteza expandida, com nível da confiança de 95%, equivalente a um fator $k = 1,96$. Isso representa, em função das premissas adotadas, que as grandezas que forem dadas diretamente pela medição de um instrumento, sem a influência de outros fatores, terão as suas incertezas expandidas equivalentes às exatidões dadas pelos respectivos fabricantes. Essa consideração vale, por exemplo, para as medições de temperatura, umidade e concentração de CO_2 . Para os demais parâmetros os cálculos de suas incertezas combinadas serão detalhados a seguir.

Ap.H.1. Incertezas nos Materiais Particulados (PMs)

O processo de medição de materiais particulados através do contador de partículas, para a determinação de sua concentração mássica no interior do ambiente avaliado, envolve algumas incertezas. Elas são referentes à exatidão dos componentes da instrumentação empregada e às premissas adotadas para a transformação os valores de contagens de partículas em dados de concentração mássica, envolvendo, dentre outros, os seguintes fatores:

- Incerteza da vazão de ar coletada pela bomba de vácuo interna do instrumento;
- Incerteza na contagem de partículas, ocasionadas pela sobreposição ou sensibilidade do instrumento;
- Incerteza no dimensionamento das partículas, realizado pelo instrumento em função da refração óptica, ocasionada pela passagem dos materiais pelo laser emitido;
- Incerteza na estimativa da massa específica dos materiais particulados, utilizada para calcular a concentração mássica.

Os valores das incertezas-padrão para os fatores acima serão estimados e, posteriormente, será utilizado o conceito de propagação de incertezas para a determinação do valor da incerteza padrão combinada, referente à determinação da concentração mássica de particulados na sala. Considerando-se a hipótese de que as grandezas avaliadas não são correlacionadas e de que o comportamento é linear, a incerteza padrão combinada pode ser obtida através da Equação (4), baseada em uma aproximação de primeira ordem da série de Taylor de $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$, conforme detalhado em INMETRO (2008).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta f}{\delta x_i} \right)^2 * u^2(x_i) \quad (4)$$

As expressões para cálculo da concentração de particulados foram apresentadas no item 4.5.3, através do emprego das Equações (4.2) e (4.3). Desenvolvendo-se a fórmula de propagação de incertezas, dada na Equação (4), para as variáveis envolvidas no processo, têm-se a Equação (5). Ela expressa a determinação da incerteza-padrão combinada dos valores de concentração mássica (C_{PM}) calculados.

$$\left(\frac{u_{C_{PM}}}{C_{PM}} \right)^2 = \left(\frac{u_Q}{Q_b} \right)^2 + \left(\frac{u_N}{N_{part}} \right)^2 + \left(\frac{u_\rho}{\rho_{part}} \right)^2 + \left[9 * \left(\frac{u_d}{d_{part}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

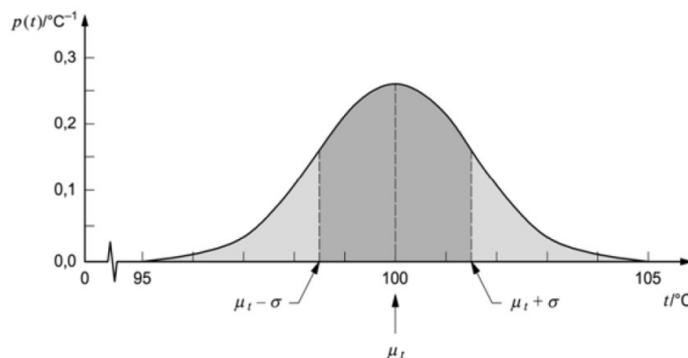
Para a incerteza referente à vazão de ar da bomba de vácuo, considerou-se o dado de exatidão para a vazão, conforme apresentado na Tabela 4.9. Para este dado, fornecido pelo fabricante, no manual do instrumento, considerou-se a hipótese de distribuição gaussiana, com nível da confiança de 95%. Obtém-se, assim, o valor de incerteza padrão, conforme Equação (6).

$$\frac{u_Q}{Q} = \frac{Exat.}{f} = \frac{0,05}{1,96} = 0,0255 \quad (6)$$

Para o número de partículas contadas, o fabricante informa os dados da exatidão no manual, apresentado também na Tabela 4.9. Porém, conforme Graywolf (2018), este dado representa o valor máximo do limite do erro de contagem, que pode ocorrer para casos de alta densidade de partículas no ambiente. Por este motivo, considerou-se um nível da confiança maior para este dado de exatidão, de 99,73%, representando um fator de abrangência de 3, conforme apresentado na Equação (7). Foi também adotada a hipótese de distribuição gaussiana, como o exemplo representado na Figura Ap.H.1.

$$\frac{u_N}{N} = \frac{Exat.}{f} = \frac{0,10}{3} = 0,0333 \quad (7)$$

Figura Ap.H.1: Exemplo de distribuição de probabilidades gaussianas (INMETRO, 2008).



Para a massa específica (ρ) dos materiais particulados no ar, não são disponibilizados pelo fabricante informações acerca das incertezas, sendo necessário buscar outras fontes para poder estimá-la. No Apêndice C, apresentou-se estudos, encontrados nas referências bibliográficas, onde foram realizados experimentos para a determinação da massa específica das partículas encontradas no ar, em diferentes regiões do mundo e em diferentes condições ambientais. Conforme discutido, o método utilizado nestes estudos, em geral, foi de realizar a comparação dos dados obtidos através de contadores de partículas com o de outros modelos de instrumentos, baseados no levantamento mássico, para calcular a massa específica média dos componentes no ar.

Para estimar uma ordem de grandeza da incerteza relativa à determinação da massa específica nos cálculos realizados no presente trabalho, utilizou-se como base os dados levantados por Zhao et al. (2017), que realizaram medições na China ao longo de diferentes estações do ano e obtiveram valores de massa específica variando entre 1,3 e 1,6 g/cm³. Isso representa uma variação de aproximadamente 10% dos valores obtidos, em relação ao valor médio, que será a margem máxima de erro utilizada como premissa na sequência das análises.

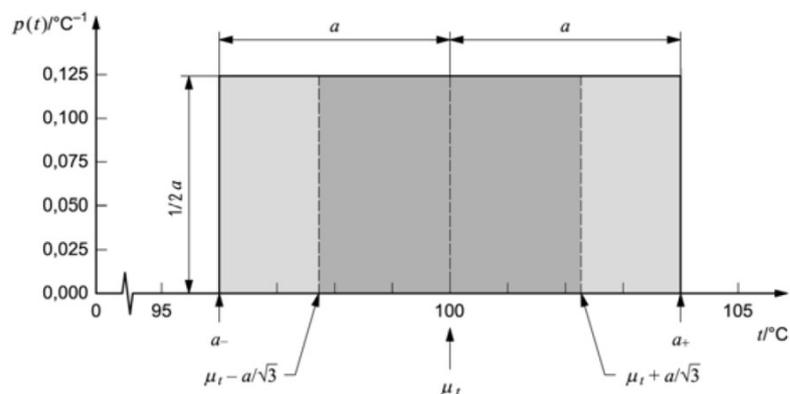
Para esta distribuição de erros, como não há informações acerca da massa específica dos particulados no local do experimento, considerou-se que seu valor possa estar distribuído com igual probabilidade em qualquer ponto no interior do intervalo considerado. Foi adotada a hipótese de que “a probabilidade de que o valor X_i esteja dentro do intervalo a^- até a^+ , para todos os fins práticos, é igual a um, e a probabilidade de que X_i esteja fora deste intervalo é, essencialmente, zero”, conforme exemplo dado no item 4.3.7 de INMETRO (2018). Estas premissas representam uma distribuição do tipo retangular, conforme representado na Figura Ap.H.2, podendo a incerteza padrão ser calculada conforme a Equação (8), onde a representa a distância entre o valor médio e o limite do intervalo.

$$u^2(y) = \frac{a^2}{3} \quad (8)$$

Assim, expandindo-se a expressão para o caso analisado, obtém-se a Equação (9), para o componente da incerteza referente à massa específica adotada para os particulados.

$$\frac{u_p}{\rho} = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0,10}{\sqrt{3}} = 0,0577 \quad (9)$$

Figura Ap.H.2: Exemplo de distribuição de probabilidades retangular (INMETRO, 2008).



O último componente a ser calculado é referente à incerteza no levantamento das dimensões das partículas pelo instrumento, através do sistema óptico. As partículas passam através de uma luz emitida por um laser e as suas dimensões são determinadas a partir da refração de luz verificada em um detector, provocada pelo contato com as partículas. Essa determinação envolve algumas das premissas utilizadas, detalhadas no item 4.5.3, como índice de refração constante e partículas com formato esférico e não porosas. Estes aspectos não serão avaliados no presente trabalho, podendo um estudo mais detalhado sobre estes efeitos ser encontrado em Hagan e Kroll (2020). Um outro estudo acerca da exatidão e capacidade de detecção de partículas, através de métodos de refração óptica, por instrumentos de medição a laser, está disponível em Beckman (2020).

Fronidzi (2005) explica as principais características e aspectos relevantes acerca do processo de medição óptica realizado por contadores de partículas, com suas propriedades e limitações, destacando que os fenômenos de espalhamento que acontecem no interior do instrumento podem ser divididos em três grandes regiões de comportamento. Essas regiões dependem da relação entre o diâmetro da partícula (d) e o comprimento da onda (λ) da luz que a ilumina, advinda do laser, conforme discriminado a seguir:

- Partículas “grandes” ($d \gg \lambda$): detector óptico apresenta boa exatidão;
- Partículas intermediárias ($d \sim \lambda$): espalhamento de Mie, onde a luz é espalhada de forma diferenciada e, dependendo da direção, há a formação de lóbulos;
- Partículas “pequenas” ($d < \lambda$): espalhamento de Rayleigh, onde a luz é espalhada de forma quase uniforme em todas as direções.

O manual do instrumento utilizado nos ensaios não informa o comprimento de onda do raio de luz emitido pelo laser empregado no equipamento. De acordo com Fronidzi (2005), porém, os comprimentos de onda utilizados em contadores de partículas costumam variar entre os valores de 0,6 a 0,8 μm . Dessa forma, pode-se verificar que as partículas dos canais menores do instrumento, de PM_1 e $\text{PM}_{0,5}$ encontram-se em efeitos de espalhamento do tipo de Mie e Rayleigh, respectivamente, regiões onde a exatidão da detecção óptica das partículas é menor. Um experimento com estudo detalhado acerca das seções de espalhamento de Mie e Rayleigh para partículas de diferentes tamanhos, realizado em laboratório, pode ser verificado em Cox et al. (2002).

Para a definição das incertezas a serem utilizadas no presente trabalho, referentes ao cálculo do diâmetro das partículas pelo instrumento, utilizaram-se valores de referências obtidos na literatura. Beckman (2020) utiliza uma incerteza de referência de 0,3 μm para partículas de 10 μm , enquanto Frondizi (2005) cita uma resolução de até 0,1 μm para contadores de partículas de alta resolução. Com base nestas informações, foram adotados valores conforme Tabela Ap.H.1 para a exatidão do instrumento para cada tamanho de particulado e suas respectivas incertezas padrão, calculadas conforme Equação (6). Adotou-se a hipótese de distribuição gaussiana, com nível da confiança de 95%, fator de abrangência $k=1,96$.

Tabela Ap.H.1: Estimativa de incertezas para o diâmetro dos materiais particulados.

Estimativa de Incertezas para Tamanho dos Particulados			
Classe	Limite	Exatidão	Incerteza-Padrão $\left(\frac{u_d}{d}\right)$
PM ₁₀	10 μm	0,30 μm (3%)	0,0153
PM _{5,0}	5 μm	0,20 μm (4%)	0,0204
PM _{2,5}	2,5 μm	0,15 μm (6%)	0,0306
PM ₁	1,0 μm	0,10 μm (10%)	0,0510
PM _{0,5}	0,5 μm	0,10 μm (20%)	0,1020

Dessa forma, com todas as incertezas estimadas para cada variável, parte-se para o cálculo da incerteza padrão combinada para a concentração mássica de particulados, utilizando-se a lei de propagação de incertezas, conforme Equação (5). Os valores obtidos de incerteza padrão combinada para os diferentes tamanhos de particulados são apresentados na Tabela Ap.H.2. São também apresentados os valores das incertezas expandidas obtidas para cada item, que foram calculadas considerando-se que a distribuição da combinação de erros se aproxima de uma gaussiana, sendo adotado nível da confiança de 95%, com $k = 1,96$, na Equação (2). Como pode-se verificar, os valores de incerteza crescem consideravelmente para partículas de menores diâmetros, indo de 16,6% para o PM₁₀ até níveis de 61,6% para o PM_{0,5}.

Tabela Ap.H.2: Incertezas calculadas para as medições de materiais particulados.

Incetezas Calculadas para os Particulados		
Classe	Incerteza-Padrão Combinada $\left(\frac{u_{CPM}}{C_{PM}}\right)$	Incerteza Expandida $\left(\frac{U_{PM}}{C_{PM}}\right)$
PM ₁₀	0,0849	0,1664
PM _{5,0}	0,0940	0,1843
PM _{2,5}	0,1163	0,2280
PM ₁	0,1689	0,3310
PM _{0,5}	0,3143	0,6161

Ap.H.2. Incertezas na Vazão de Ar Externo

A exatidão informada pelo fabricante do instrumento utilizado para as medições de vazão, realizadas durante os experimentos, encontra-se detalhada na Tabela 4.12. Para a obtenção do valor final de vazão volumétrica devem ser aplicados fatores de correção, que são função da temperatura e da pressão barométrica, conforme Equação (1). Após a determinação da vazão volumétrica, o cálculo da vazão mássica de ar insuflado no ambiente monitorado, da Sala A2, é realizado através das Equações (2), (5) e (6), sendo função da temperatura, da umidade relativa e da pressão barométrica.

Estes parâmetros envolvidos nos cálculos são grandezas medidas durante o experimento, para as condições do ar externo, possuindo também as suas respectivas incertezas. Neste presente item, busca-se avaliar a influência destes fatores sobre a incerteza combinada dos valores de vazão de ar calculados.

Os valores de exatidão do termo-higrômetro utilizado nos experimentos, para a temperatura e a umidade relativa, estão disponíveis na Tabela 4.7. Já os dados de pressão barométrica foram obtidos da tabela horária de dados meteorológicos para cidade de São Paulo, estação da Ponte dos Remédios, disponível em CETESB (2022). Sua exatidão foi estimada com base nas variações verificadas ao longo do dia, que representaram um delta de 5 mbar, tendo sido estimada uma exatidão de 2,5 mbar (0,25 kPa) ao redor do valor médio, com resolução dos valores informados igual a 1 mbar (0,1 kPa).

Para a incerteza relativa ao fator de correção de perda de carga, dado pelo Gráfico Ap.G.1, por sua vez, considerou-se a exatidão de leitura como um quarto da menor escala do eixo vertical, referente a 0,0025. Essa consideração teve como base o detalhamento dos valores que um observador consegue inferir, utilizando o gráfico de correção fornecido pelo fabricante.

Para estes valores estimados de exatidão, utilizou-se a premissa de distribuição gaussiana de erros, com nível da confiança de 95%. Dessa forma, as respectivas incertezas padrão são calculadas dividindo pelo fator de abrangência $k = 1,96$. Na Tabela Ap.H.3, são apresentados o valor de exatidão utilizado e a incerteza padrão calculada para cada parâmetro envolvido. Para realizar uma simulação da influência de cada fator, definiu-se também uma condição de referência. Essa condição será utilizada como base para os cálculos ilustrativos da incerteza da vazão de ar, apresentados na sequência.

Tabela Ap.H.3: Incertezas-padrão para parâmetros envolvidos no cálculo da vazão de ar.

Incertezas para Parâmetros do Cálculo da Vazão				
Classe	Exatidão	Incerteza-Padrão	Valor de Referência	Incerteza-Padrão (%)
Q_{lido}	3% do valor	1,53% do valor	-	0,0153
TBS	0,8 °C	0,41 °C	21°C (294K)	0,0014
UR	3% de UR	1,53% de UR	50% de UR	0,0306
P	0,25 kPa	0,13 kPa	92,5 kPa	0,0014
k_{pc}	0,0025	0,0013	1,00	0,0013

Com os valores das incertezas-padrão dos parâmetros definidos, pode-se realizar o cálculo da incerteza padrão combinada do cálculo da vazão corrigida, através da lei de propagação de incertezas, dada na Equação (4), considerando que as variáveis sejam independentes entre si. Desenvolvendo a formulação para a expressão da correção da vazão volumétrica da Equação (1), chega-se à Equação (10), para a expressão de sua incerteza-padrão combinada.

$$\left(\frac{u_{Q_{corr}}}{Q_{corr}}\right)^2 = \left(\frac{u_{Q_{lido}}}{Q_{lido}}\right)^2 + \left(\frac{u_{k_{pc}}}{k_{pc}}\right)^2 + \frac{1}{4} * \left[\left(\frac{u_P}{P}\right)^2 + \left(\frac{u_{TBS}}{TBS}\right)^2\right] \quad (10)$$

Visualiza-se que a influência dos fatores de pressão e temperatura na incerteza combinada é ponderado por um fator de $\frac{1}{4}$. Substituindo por valores, têm-se:

$$\frac{u_{Q_{corr}}}{Q_{corr}} = \sqrt{(0,0153)^2 + (0,0013)^2 + \frac{1}{4} * [(0,014)^2 + (0,0014)^2]} = 0,0154 \quad (11)$$

Dessa forma, verifica-se que a influência acrescida no cálculo da incerteza-padrão combinada pela consideração dos fatores de correção é da ordem de apenas 0,01%. Por este motivo, estes fatores podem ser desprezados no cálculo da incerteza da vazão volumétrica de cada difusor, que será tratada na sequência do trabalho somente pela exatidão fornecida pelo fabricante do instrumento de medição, do tipo coifa.

Já para a verificação dos componentes da incerteza referentes ao cálculo da vazão mássica, será, primeiramente, calculada a incerteza referente à determinação da pressão de vapor, em função do TBS, através da Equação (6). A Equação (12) realiza a propagação da incerteza da medida de temperatura, sendo desprezada a incerteza referente aos coeficientes da expressão.

$$u_{P_v}^2 = \sum_{i=1}^6 [C_i * i * TBS^{(i-1)} * u_{TBS}]^2 \quad (12)$$

Substituindo-se os valores de referência e incertezas padrão adotados na Tabela Ap.H.3, para a temperatura, chega-se à incerteza-padrão combinada para pressão de vapor de 0,0137 (1,37%) do valor calculado para a grandeza.

Em posse da incerteza para a pressão de vapor, pode-se obter a incerteza-padrão combinada para a massa específica, conforme Equação (13). Ela é definida aplicando-se a lei de propagação de incertezas sobre a Equação (5), atentando para utilização de TBS em Kelvin.

$$\left(\frac{u_\rho}{\rho}\right)^2 = \left(\frac{u_{TBS}}{TBS}\right)^2 + \frac{u_P^2 + (UR^2 * u_{P_v}^2) + (P_v^2 * u_{UR}^2)}{[P - (UR * P_v)]^2} \quad (13)$$

Realizando-se o cálculo com os valores de referência adotados, chega-se à incerteza-padrão combinada de 0,002 (0,2%) do valor da massa específica calculada. Essa incerteza é baixa, em função dos componentes referentes à temperatura e à pressão também serem pequenos e possuírem maior impacto no valor final do que a umidade relativa e a pressão de vapor.

Pode-se, então, calcular a incerteza para a vazão mássica em cada difusor, através da Equação (14), que realiza a propagação das incertezas sobre a expressão dada pela Equação (2).

$$\left(\frac{u_{\dot{m}_l}}{\dot{m}_l}\right)^2 = \left(\frac{u_{Q_{corr}}}{Q_{corr}}\right)^2 + \left(\frac{u_\rho}{\rho}\right)^2 \quad (14)$$

Substituindo pelos valores já calculados, têm-se que

$$\frac{u_{\dot{m}_l}}{\dot{m}_l} = \sqrt{(0,0154)^2 + (0,0020)^2} = 0,0155 \quad (15)$$

Pode-se visualizar que, no cálculo da incerteza-padrão combinada para a vazão mássica, os demais fatores atuantes contribuem com apenas 0,02%, em relação ao valor da incerteza da vazão lida no instrumento. Dessa forma, verifica-se ser uma consideração válida desprezar os efeitos dos demais fatores ambientais e adotar a incerteza da vazão mássica de insuflamento de cada difusor como sendo equivalente à exatidão do instrumento.

Para o cálculo da incerteza da soma das vazões medidas nos difusores de ar externo, que insuflam ar no ambiente, pode-se utilizar a equação (16), onde \dot{m}_{AE} é a vazão total de ar de renovação na sala e N_{CX} é o número de caixas de ventilação que se encontram em operação em um dado momento, podendo variar entre 1 e 4 caixas em operação.

$$u_{\dot{m}_{AE}}^2 = \sum_{i=1}^{N_{CX}} u_{\dot{m}_i}^2 \quad (16)$$

Para um caso hipotético, em que as vazões nos difusores sejam iguais, chega-se à expressão dada pela Equação (17).

$$\frac{u_{\dot{m}_{AE}}}{\dot{m}_{AE}} = \frac{1}{\sqrt{N_{CX}}} * \frac{u_{\dot{m}_i}}{\dot{m}_i} \quad (17)$$

Pode-se, portanto, verificar que quanto maior o número de caixas de ventilação em operação, pela fórmula de propagação de incertezas, menor será a proporção da incerteza sobre o valor da grandeza, em termos percentuais. Na Tabela Ap.H.4, são detalhados os valores de incerteza obtidos para casos de 1 a 4 caixas ligadas. Esse cálculo foi realizado desprezando-se os efeitos dos demais parâmetros além da exatidão do instrumento, conforme discutido anteriormente, e considerando-se nível da confiança de 95% para a incerteza expandida (fator $k=1,96$).

Tabela Ap.H.4: Incertezas calculadas para vazão de ar em função das caixas em operação.

Incertezas Calculadas para a Vazão		
Número de Caixas em Operação	Incerteza-Padrão Combinada $\left(\frac{u_{\dot{m}_{AE}}}{\dot{m}_{AE}}\right)$	Incerteza Expandida $\left(\frac{U_{\dot{m}_{AE}}}{\dot{m}_{AE}}\right)$
01	0,0153	0,0300
02	0,0108	0,0212
03	0,0088	0,0173
04	0,0077	0,0150

Ap.H.3. Incertezas nos Fungos Viáveis

Em relação às análises biológicas realizadas durante os experimentos, referentes às coletas das amostras de ar no ambiente e à contagem dos fungos viáveis após o período de incubação, a equipe do laboratório da Conforlab Engenharia Ambiental, que forneceu todo o apoio para as análises, disponibilizou valores da incerteza referentes ao processo de contagem. Esses dados foram apresentados em conjunto com as concentrações calculadas para os fungos viáveis, nos relatórios de análise elaborados para cada ensaio.

De acordo com a definição dada na Resolução RDC N°166 da ANVISA (2017), o limite de quantificação é a menor quantidade do analito em uma amostra que pode ser determinada com precisão e exatidão aceitáveis sob as condições experimentais estabelecidas. Para o caso estudado, o LIQ (Limite Inferior de Quantificação) informado pelo laboratório, expresso em unidades de formação de colônias, foi de 7 UFC/m³.

Já em relação às incertezas, os valores informados pelo laboratório para cada ensaio, ao se realizar o cálculo porcentual, em relação ao valor obtido de concentração, ficaram na faixa entre 9,0% e 9,2%. Para estes valores de incerteza informados pelo laboratório, considerou-se a hipótese de distribuição gaussiana de erros, com nível da confiança de 95%, representando um fator de abrangência $k = 1,96$. Pode-se assim calcular a incerteza-padrão, conforme a Equação (18), utilizando como base o valor máximo entre aqueles fornecidos pelo laboratório.

$$\frac{u_{C_{lab}}}{c_{FV}} = \frac{1}{k} * \frac{U_{C_{lab}}}{C_{lab}} = \frac{0,0920}{1,96} = 0,0469 \quad (18)$$

Sobre esta incerteza da contagem das partículas informada pelo laboratório, iremos acrescentar a influência da exatidão referente à vazão de ar, provida pela bomba de vácuo do amostrador, informada no item 4.5.6, cuja incerteza padrão será dada conforme Equação (19).

$$\frac{u_Q}{Q_b} = \frac{Exat.}{f} = \frac{0,01}{1,96} = 0,0051 \quad (19)$$

Aplicando-se a lei propagação das incertezas, dada pela Equação (4), sobre a expressão de cálculo da concentração de fungos viáveis da Equação (4.4), chega-se à expressão para cálculo da incerteza-padrão combinada, disponível na Equação (20). Nesta expressão, desprezam-se

eventuais erros referentes à marcação do tempo de amostragem, que será pequena, da ordem de segundos, frente ao tempo de coleta de 5 minutos utilizado.

$$\left(\frac{u_{C_{FV}}}{C_{FV}}\right)^2 = \left(\frac{u_{C_{lab}}}{C_{FV}}\right)^2 + \left(\frac{u_Q}{Q_b}\right)^2 \quad (20)$$

Substituindo-se pelos valores calculados para os componentes das incertezas nas Equações (18) e (19), têm-se:

$$\frac{u_{C_{FV}}}{C_{FV}} = \sqrt{(0,0469)^2 + (0,0051)^2} = 0,0472 \quad (21)$$

Finalmente, para o cálculo da incerteza expandida, considerando-se o nível de confiança de 95%, pode-se utilizar a Equação (22) a seguir.

$$\frac{U_{C_{FV}}}{C_{FV}} = k * \frac{u_{C_{FV}}}{C_{FV}} = 1,96 * 0,0472 = 0,0925 \quad (22)$$

Dessa forma, verifica-se que a contribuição da incerteza da vazão de ar é pequena, de apenas 0,05% sobre o valor de incerteza informado pelo laboratório, o que é explicado pela exatidão alta da bomba, que é regulada antes dos ensaios para se manter dentro de uma faixa estreita de vazão. Outros fatores referentes às medições, como eficiência do amostrador para a coleta de partículas, representatividade dos pontos coletados frente ao ambiente estudado e tempo de incubação das amostras, não foram avaliados neste cálculo das incertezas, uma vez que os processos de coleta, com amostrador de Andersen, e de análise laboratorial seguiram todas as recomendações para a avaliação de fungos viáveis presentes em ANVISA (2003), conforme detalhado no item 4.5.6.

ANEXOS

Anexo A – Contaminantes em Ambientes Internos e Fontes

EPA (2022) detalha elementos poluentes que podem ser encontrados em ambientes internos e suas principais fontes, conforme detalhado na adaptação realizada abaixo:

- **Amianto (asbesto):** fibra mineral relacionada principalmente aos materiais utilizados de construção, embalagens e revestimentos, relacionada a efeitos cancerígenos pela Organização Mundial da Saúde (WHO, 2018)
- **Agentes Biológicos:** pólen, vírus, bactérias, fungos, protozoários e demais agentes biológicos, que podem ser transmitidos por animais e pessoas no interior do ambiente ou trazidos do ar externo pelo sistema de renovação e por contaminações nas redes de dutos e componentes do sistema de climatização;
- **Monóxido de Carbono (CO):** liberado por exemplo em escapamento de automóveis, com risco incrementado para tomadas de ar próximas de garagens e estacionamentos, além da queima incompleta de combustíveis em caldeiras e aquecedores, vazamentos de chaminés etc.;
- **Fornos de cozinha:** Gases emitidos por fornos caseiros que utilizam materiais sólidos como madeira, carvão e resíduos, que, na ausência de ventilação adequada, podem adentrar as residências e causar graves danos à saúde dos ocupantes com a exposição prolongada;
- **Formaldeídos:** presentes em materiais de construção e itens de uso doméstico, como isolamentos, resinas para madeira, tintas e similares. Podem causar irritações de pele, olhos, nariz e garganta e, em altas exposições, alguns tipos de câncer (ACS, 2022).
- **Chumbo:** emitido por uma variedade de fontes, como tintas antigas à base de chumbo e poeiras advindas de fontes externas, como solos contaminados e processos de solda;
- **Dióxido de Nitrogênio (NO₂):** advindo de processos de combustão em automóveis, caldeiras, fornos, processos de solda e cigarro, podendo ser amplificado em ambientes internos em decorrência da aplicação de sistemas de combustão mal ventilados ou com ventilação deficiente;
- **Compostos orgânicos semivoláteis (COS-V):** referentes a uma variedade de produtos químicos, presentes em produtos de uso doméstico, como inseticidas e desinfetantes, além de pesticidas e produtos de jardinagem, que podem ser trazidos para o ambiente interno por meio do sistema de ventilação;

- **Radônio:** elemento radioativo natural que pode entrar nos ambientes internos através de aberturas no solo, piso e fundações, representando riscos em ambientes confinados e mal ventilados. Sua exposição prolongada tem sido relacionada a casos de câncer de pulmão (DARBY et al., 2004).
- **Materiais Particulados (PMs):** mistura de partículas sólidas e líquidas suspensas no ar, com dimensões da ordem micrômetros (μm). Podem ser originárias do ambiente externo, trazidas através do sistema de ventilação, ou produzidas por fontes internas, como chaminés, aquecedores etc.
- **Fumaça de Tabaco:** fumaça absorvida de forma passiva através da emissão de gases tóxicos emanados pelo fumo de derivados do tabaco;
- **Compostos Orgânicos Voláteis (COVs):** presentes em gases emitidos por produtos domésticos, como produtos de limpeza, desinfetantes, repelentes, tintas, aerossóis etc. Estudos têm apresentado níveis verificados em ambientes internos consideravelmente superiores aos das áreas externas, como exemplo disponível em Lee et al. (2018). Podem causar efeitos prejudiciais à saúde como reações alérgicas, náuseas, dificuldade para respirar e, em alguns casos, câncer (ALA, 2022);
- **Fumaça de Madeira:** mistura de gases e materiais particulados (PMs), principalmente partículas finas prejudiciais à saúde, emitidos através da queima de madeira, realizada por exemplo em fornos de cozinha, cujos gases podem ser liberados no interior do ambiente em casos de exaustão deficiente, além de queimadas florestais.

Anexo B – Critérios para Episódios Agudos de Poluição do Ar

O Decreto Nº 59.113 (SÃO PAULO, 2013) estabelece critérios para a definição de episódios agudos de poluição do ar, através da declaração dos estados de Atenção, Alerta e Emergência. A declaração destes estados, além dos níveis de concentração ultrapassados da Tabela An.B.1, requer a previsão de condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão dos poluentes (CETESB, 2022). As partículas inaláveis finas referem-se ao $PM_{2,5}$, enquanto as partículas inaláveis referem-se ao PM_{10} .

Tabela An.B.1: Critérios para episódios agudos de poluição do ar no Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2013).

Critérios para episódios agudos de poluição do ar (Decreto Estadual nº 59113 de 23/04/2013)			
Parâmetros	Atenção	Alerta	Emergência
partículas inaláveis finas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 24h	125	210	250
partículas inaláveis ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 24h	250	420	500
dióxido de enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 24h	800	1.600	2.100
dióxido de nitrogênio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 1h	1.130	2.260	3.000
monóxido de carbono (ppm) – 8h	15	30	40
ozônio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 8h	200	400	600

Conforme CETESB (2022), para cada poluente medido calcula-se ainda um índice, que é um valor adimensional em função do qual o ar recebe uma qualificação, relacionada a uma cor, conforme representado na Tabela An.B.1.

Tabela An.B.2: Estrutura do Índice de Qualidade do Ar (CETESB, 2022).

Qualidade	Índice	MP ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24h	MP _{2,5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24h	O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 8h	CO (ppm) 8h	NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 1h	SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24h
N1 – Boa	0 – 40	0 – 50	0 – 25	0 – 100	0 – 9	0 – 200	0 – 20
N2 – Moderada	41 – 80	>50 – 100	>25 – 50	>100 – 130	>9 – 11	>200 – 240	>20 – 40
N3 – Ruim	81 – 120	>100 – 150	>50 – 75	>130 – 160	>11 – 13	>240 – 320	>40 – 365
N4 – Muito Ruim	121 – 200	>150 – 250	>75 – 125	>160 – 200	>13 – 15	>320 – 1130	>365 – 800
N5 – Péssima	>200	>250	>125	>200	>15	>1130	>800

Anexo C – Tabelas de Medições Oficinas de Carrinhos de Rolimã

No presente anexo, são apresentados os dados monitorados para cada parâmetros durante as diferentes edições das Oficinas de Carrinhos de Rolimã, utilizados como base para a construção dos gráficos de variação dos parâmetros detalhados no Item **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**

Foram monitorados os parâmetros de qualidade do ar interior e do ar externo ao longo das sucessivas edições do evento, desde 2016, tendo sido acompanhadas no presente trabalho as medições realizadas no ano de 2018. Os dados detalhados das edições de 2016 e 2017, apresentados a título de comparação ao longo das análises apresentadas dos parâmetros, podem ser visualizados em Fakhoury (2017) e Dal Pogeto (2018).

Todas as medições ocorreram no ambiente da Sala de Aula A2, localizado no departamento de engenharia mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), cujos dados construtivos podem ser verificados no item 4.3.1.

An.C.1. Oficina de Carrinhos de Rolimã - Edição de 2016

Tabela An.C.1: Dados das medições Oficina de Carrinhos de Rolimã, edição de 2016, 1º Dia, 21/10/2016 (Fakhoury, 2017)

HORA	TBS (°C)		UR (%)		PM ₁₀ (ug/m ³)		PM _{2,5} (ug/m ³)		CO ₂ (ppm)		Observações			
	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Ocupantes	Geral	Vazão de ar externo aproximada (m ³ /h)	Vazão aproximada por pessoa (m ³ /h)
8h00	15,4	11,1	53,2	63,9	93,4	122,2	42,5	43,3	469	448	1		0	0
8h10	15,8	11,9	55,9	62,2	101,7	124,8	35,4	42,7	487	457	2		0	0
8h20	15,1	11,7	55,3	63,5	93,9	123,4	34,5	42,9	481	463	1		0	0
8h30	15,2	11,3	54,7	61,5	97,3	123,1	34,8	43,8	482	454	2		0	0
8h40	15,1	11,8	53,7	59,4	109,2	110,7	35,6	43,2	485	453	2		0	0
8h50	15,8	11,7	54,2	58,1	179,8	108,3	38,4	41,6	531	454	10		0	0
9h00	15,6	12,1	53,3	57,4	140,1	88,5	37,3	37,8	558	449	10		0	0
9h10	16,1	12,8	52,3	55,7	112,8	82,4	35,1	35,7	590	450	11		0	0
9h20	16,2	13,3	50,8	53,4	88	84,8	32,9	35,9	576	448	11		0	0
9h30	16,1	13,4	50,9	52,3	96,8	82,6	32,2	33,4	588	444	12		0	0
9h40	16,3	13,8	50,8	48,4	98,2	52,2	31,6	23,1	591	451	12		0	0
9h50	16,3	13,7	50,2	47,3	97,6	40,8	29,8	17,3	605	432	12		0	0
10h00	16,6	13,9	48,8	45,6	97,4	33,7	26,1	13,8	622	421	12	Início da operação da unidade 1 de ar externo	558	47
10h10	17,1	14,1	46,5	44,9	82,1	41,7	21,9	17,1	596	419	12		558	47
10h20	16,6	14,3	47,3	43,3	106,2	34,3	24,6	15,7	594	435	12	Movimentação dos alunos	558	47
10h30	17,3	14,6	44,7	42,9	102,3	33,1	23,3	14,9	588	441	12	Movimentação dos alunos	558	47
10h40	17,1	14,5	44,6	42,2	89	38,7	17,1	18,5	591	437	12		558	47
10h50	17,7	14,6	43	41,3	68,9	42,7	16,7	20,9	592	438	12		558	47
11h00	17,2	14,8	42,9	42,5	65,3	44,2	16,5	21,4	589	435	12	Início da operação da unidade 1 e 3 de ar externo	1100	92
11h10	17,6	14,9	41,4	41,4	59,1	48,6	15,1	22,8	560	429	12		1100	92
11h20	17,7	15,1	40,5	42,1	61,3	45,8	15,4	19,5	555	428	12		1100	92
11h30	17,9	15,7	39,8	40,4	101,3	46,3	38,9	18,6	552	430	12	Movimentação dos alunos atividade prática; furação	1100	92
11h40	17,8	15,5	40,2	39,8	295,2	44,7	120,1	17,9	554	425	12	Lixamento e furação;	1100	92
11h50	18,1	15,6	40,1	39,2	302,6	43,1	124,5	17,2	551	428	12	Lixamento e furação;	2200	183
12h00	18,3	16,1	37,9	39,1	182,5	38,2	63,1	15,1	528	423	12	Lixamento e furação; 11h51 operação das 4 unidades	2200	183
12h10	18,6	16,9	36,8	38,8	146,9	29,7	54,3	10,3	507	437	12	Lixamento e furação;	2200	183
12h20	18,8	17,5	36,3	38,2	93,1	28,4	29,3	11,8	491	426	12	Movimentação dos alunos	2200	183
12h30	19	17,2	36,7	39,1	105,3	26,2	35,8	12,1	532	424	11	Movimentação dos alunos; 12h22 Operação da unidade 1	558	51
12h40	18,5	17,7	38,6	35,9	82,5	29,2	22,2	10,6	544	413	11		558	51
12h50	18,9	18,5	38,3	36,3	77,9	31,5	18,8	9	559	418	11		558	51
13h00	18,8	18,3	38,6	36,9	104,3	27,4	23,3	10,3	562	422	10	Movimentação dos alunos	558	56
13h10	19,1	18,7	38,2	36,5	122,1	27,9	22,8	9,8	575	423	10	Movimentação dos alunos; Corrida de carrinhos	558	56
13h20	19,2	18,9	37,3	36,3	190,2	28,6	26,9	11,1	578	420	10	Movimentação dos alunos; Saída dos alunos	558	56

Tabela An.C.2: Dados das medições Oficina de Carrinhos de Rolimã, edição de 2016, 2º Dia, 22/10/2016 (Fakhoury, 2017)

HORA	TBS (°C)		UR (%)		PM _{2.5} (µg/m³)		PM ₁₀ (µg/m³)		CO ₂ (ppm)		Observações			
	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Ocupantes	Geral	Vazão de ar externo aproximada (m³/h)	Vazão aproximada por pessoa (m³/h)
9h20	22,7	18,3	65,7	78,4	1,3	0,7	16,4	3,6	486	412	2	Todas as unidades ligadas	2200	1100
9h30	22,7	19,1	65,6	76,8	2,4	0,8	56,9	5	479	411	2	Unidades desligadas	0	0
9h40	22,7	19,5	66,1	76,6	3,9	0,7	79,3	5,6	472	412	2	-	0	0
9h50	23,2	19,5	64,1	76,5	3,4	0,8	60,8	6,2	457	412	2	-	0	0
10h00	23,4	19,8	64,1	76,6	3,9	1,3	76,6	6,5	523	420	17	-	0	0
10h10	23,3	19,2	65,4	77,9	3,3	1,3	60,9	6	609	426	18	-	0	0
10h20	23,5	19,3	64,9	76,9	2,9	1,3	58,4	8,4	631	441	12	-	0	0
10h30	23,4	19,4	65,3	77,1	2,5	1,3	40,8	7,2	626	430	14	-	0	0
10h40	23,6	19,9	64,8	75,8	2,2	1,4	39,5	6,2	638	423	18	-	0	0
10h50	23,4	19,7	66,9	76,5	2,2	1,4	44,1	6,3	696	420	18	-	0	0
11h00	23,9	20	65,3	75,7	2,6	1,4	56,7	6,1	792	422	40	-	0	0
11h10	23,4	20,1	67,4	76,4	3,5	1,4	83	6,2	933	421	37	-	0	0
11h20	24	19,8	64,7	73,4	3,1	1,3	65,5	6,5	1022	412	37	-	0	0
11h30	23,1	20,4	68,5	75,4	4,9	1,4	104,1	6,3	1073	415	37	-	0	0
11h40	23,3	21,2	65,8	71,4	5,2	1,6	93,7	6,8	1102	427	37	-	0	0
11h50	23,4	21	68,1	71,8	4,6	1,5	83,2	6,9	1237	422	38	-	0	0
12h00	23,6	20,4	66,3	73,5	4,2	1,4	69,1	4,6	1255	410	40	-	0	0
12h10	23,1	20,6	66,7	72,8	4,1	1,4	75	5,5	1316	417	41	-	0	0
12h20	23,5	20,9	66,4	71,1	3,9	1,4	75,6	4,2	1353	423	39	-	0	0
12h30	23,7	20,6	63,7	73,1	3,7	1,1	76,1	4,2	1336	409	39	-	0	0
12h40	22,7	20,7	66,8	72,5	3,6	1,2	82,8	4,5	1306	414	8	Saída dos alunos	0	0
14h00	23,6	20,9	66,2	72,8	3,2	4,5	77,1	10,8	1187	434	39	-	0	0
14h10	23,1	20,8	68,5	71,7	2,8	4,2	61,3	9,7	1081	428	39	Ligou-se a unidade 1 e 3	1100	28,2
14h20	23,4	20,4	65,1	73,3	2,7	2,1	53,2	4,6	1059	409	39	-	1100	28,2
14h30	22,9	20,5	66,3	73,9	6,6	2,3	54,1	6,8	1004	411	39	Corte e furação de madeira	1100	28,2
14h40	22,7	20,6	67,1	74,2	7,3	2,5	71,7	5,7	980	418	39	Corte e furação de madeira	1100	28,2
14h50	23,3	20,5	66,1	73,4	7,2	2,3	76,1	5,5	985	415	39	Corte e furação de madeira	1100	28,2
15h00	23,4	20,4	64,5	73,9	6,7	2,4	62,2	5,8	989	411	39	Corte e furação de madeira	1100	28,2
15h10	23,3	20,5	66,1	73,6	6,9	2,5	59,9	5,9	1010	412	39	Corte e furação de madeira	1100	28,2
15h20	23,5	20,2	64,4	71,7	7	2,2	259,3	5,9	998	416	39	Lixamento de madeira	1100	28,2
15h30	22,6	20,3	65,3	72,4	7,1	2,3	256	5,7	995	415	39	Lixamento de madeira	1100	28,2
15h40	22,9	20,3	62,3	73,4	7,4	2,6	157,4	11,7	910	412	39	Todas as unidades/ lixamento	2200	56,4
15h50	23,1	20,2	65,7	73,1	5,2	3,2	123,8	8,1	834	421	39	Lixamento e corte	2200	56,4
16h00	23	20,1	66	73,1	7	2,1	176,2	4,9	826	410	39	Lixamento e corte	2200	56,4
16h10	23,4	20,2	65,1	75,2	10,9	2,2	171,3	5,1	815	412	39	Lixamento e corte	2200	56,4
16h20	23,8	20	61,3	72,9	11,8	1,3	132,5	3,8	820	407	39	arrumação da sala	2200	56,4
16h30	23,4	20,3	61,6	73	9,1	1,2	67,8	3,9	808	415	39	arrumação da sala	2200	56,4
16h40	23,1	20,2	61,9	73,4	8,3	1,5	44,6	4,1	810	412	39	-	2200	56,4
16h50	23,4	20,1	62	73,2	8	1,6	41,6	4	805	412	39	-	2200	56,4

An.C.2. Oficina de Carrinhos de Rolimã - Edição de 2017

Tabela An.C.3: Dados das medições Oficina de Carrinhos de Rolimã, edição de 2017, 1º Dia, 21/10/2017 (Dal Pogeto, 2018)

Horário	CO2 [ppm]		PM10 [µg/m³]		PM2,5 [µg/m³]		TBS [°C]		UR [%]		Nº de pessoas	Vazão [m³/h]	ABNT Nível 3 [m³/h]	Portaria 3523 MS [m³/h]	Comentários
	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo					
8:00	428		19,0		13,8		23,5		68,3		1	0	658	27	Condição inicial da sala, logo depois de ser aberta
9:00	474	410	34,5	30,6	12,4	12,5	23,7	22,7	67,7	70,0	1	550	658	27	Leve arrumação da sala, movimentação de algumas mesas e cadeiras, sistema de ar condicionado ligado as 9h
9:30	455	397	13,9	29,4	7,8	13,1	24,2	22,9	65,2	64,2	1	550	658	27	Apresentação para crianças em outra sala
9:45	457	425	12,8	32,0	7,0	14,2	24,3	23,0	64,1	65,1	1	550	658	27	Apresentação para crianças em outra sala
10:00	453	428	10,8	43,6	6,5	16,3	24,4	23,2	63,1	65,4	1	550	658	27	Apresentação para crianças em outra sala e pessoas fumando no estacionamento
10:15	515	406	23,9	40,8	7,0	16,6	24,7	23,4	62,4	61,9	21	550	1198	567	Crianças e monitores entram na sala
10:30	733	396	50,2	34,4	8,5	14,6	24,3	23,7	62,7	61,2	36	550	1603	972	Alta movimentação de pessoas
10:45	1003	392	67,3	33,6	9,1	15,1	24,6	23,7	52,4	61,0	40	550	1711	1080	Alta movimentação de pessoas
11:00	1234	439	67,4	35,5	9,1	15,2	24,5	24,0	50,1	59,6	40	550	1711	1080	Alta movimentação de pessoas
11:15	1334	450	58,7	43,0	9,2	18,4	24,8	23,9	52,9	62,9	41	1100	1738	1107	Alta movimentação de pessoas
11:30	1379	436	63,4	39,7	9,7	17,7	24,8	23,7	51,6	62,9	47	1100	1900	1269	
11:45	1365	419	58,4	46,3	10,4	21,3	24,6	23,8	50,3	62,9	44	1100	1819	1188	
12:00	1406	489	69,3	44,1	10,7	20,9	24,6	24,1	50,4	60,4	44	1100	1819	1188	Saída para o almoço
13:30	510	406	11,7	57,2	10,0	27,2	24,9	24,8	53,6	59,5	1	1100	658	27	Volta do almoço e atividade fora da sala
14:15	512	409	29,6	55,1	12,1	25,4	23,8	24,8	56,8	61,8	24	1100	1279	648	Entrada das crianças da atividade fora de sala
14:30	724	399	48,4	58,4	13,8	27,6	24,8	25,3	53,6	59,2	31	1100	1468	837	
14:45	871	419	76,5	71,2	14,5	30,5	24,9	25,2	51,1	58,3	32	1100	1495	864	Lixação média, chuva leve
15:00	958	433	119,4	73,3	15,8	30,2	24,6	24,4	50,1	62,2	34	1100	1549	918	Lixação média
15:15	1131	416	121,0	75,3	12,0	34,7	24,6	25,0	50,6	59,8	37	1100	1630	999	Lixação média e furação leve
15:30	1173	431	173,4	73,4	18,0	33,8	24,6	24,8	50,6	59,9	41	1100	1738	1107	Após as medições, aumentou-se a vazão de ar externo
15:45	1033	431	131,6	78,3	18,9	32,1	25,0	24,8	52,1	60,4	44	2200	1819	1188	Lixação e furação
16:00	1016	421	136,3	70,9	19,3	34,0	24,9	25,0	52,7	58,0	39	2200	1684	1053	Lixação e furação
16:15	988	438	118,0	68,4	20,0	29,4	24,8	24,7	51,0	58,5	33	2200	1522	891	
16:30	978	432	112,4	69,4	19,2	31,1	25,0	24,7	51,2	58,7	34	2200	1549	918	Encerramento do dia
16:45	909		106,7		17,9		24,9		50,9		16	2200	1063	432	Crianças saindo da sala
17:00												2200	631	0	

Tabela An.C.4: Dados das medições Oficina de Carrinhos de Rolimã, edição de 2017, 2º Dia, 22/10/2017 (Dal Pogeto, 2018)

Horário	CO2 [ppm]		PM10 [µg/m³]		PM2,5 [µg/m³]		TBS [°C]		UR [%]		Nº de pessoas	Vazão [m³/h]	ABNT Nível 3 [m³/h]	Portaria 3523 MS [m³/h]	Comentários
	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo					
8:45	534		30,5		15,9		24,2		60,0		8	0	847	216	
9:15	657	411	46,9	26,7	10,0	13,9	24,2	22,0	65,6	72,2	36	550	1603	972	Crianças chegaram as 9h e as atividades começaram as 9h15
9:30	778	414	65,0	23,0	9,6	12,5	24,5	22,1	67,0	72,7	33	550	1522	891	Diminuída a vazão, atividades de lixamento
9:45	928	415	114,4	23,5	11,9	13,4	22,4	22,2	71,7	72,5	35	550	1576	945	Configurou-se o setpoint do ar condicionado para 23°C
10:00	1079	449	106,1	24,1	11,9	11,7	22,8	21,3	68,2	76	31	550	1468	837	
10:15	1245	466	109,0	23,5	11,6	11,4	22,8	21,2	71,4	75,4	36	550	1603	972	
10:30	1424	450	215,9	27,8	13,8	11,9	23,1	21,3	69,9	76,7	40	550	1711	1080	Mongatem dos carrinhos, atividades de usinagem e lixamento
10:45	1430	459	184,8	25,3	13,5	11,8	23,1	21,0	71,6	77	35	1100	1576	945	
11:00	1409	466	147,6	24,6	12,5	11,9	23,1	21,3	73,6	76,3	38	1100	1657	1026	
11:15	1376	431	109,3	26,6	11,1	12,8	23,0	21,4	72,1	76,3	38	1100	1657	1026	
11:30	1347	431	90,8	24,7	10,0	11,5	23,2	20,9	72,5	77,6	35	1100	1576	945	
11:45	1227	447	90,0	26,7	9,7	12,2	22,7	21,1	72,0	77,9	38	1100	1657	1026	Saída para o almoço
13:30	798	431	83,9	36,6	9,9	17,9	23,3	22,2	64,8	76,8	39	1100	1684	1053	Volta do almoço as 13h20
13:45	931	461	74,0	36,1	10,0	15,8	23,1	22,0	62,8	76,2	37	1100	1630	999	
14:00	967	417	100,2	31,7	10,0	19,1	23,1	22,1	60,4	75,3	35	1100	1576	945	Uso intenso de grosas
14:15	951	442	104,9	28,3	10,8	13,7	23,7	21,8	66,6	76	31	2200	1468	837	
14:30	898	429	84,0	31,0	9,9	13,1	23,4	21,6	68,3	76,2	18	2200	1117	486	
14:45	686	425	34,2	43,2	8,4	13,2	23,0	22,0	70,3	76,5	1	2200	658	27	Saída das crianças para pintura dos carrinhos
15:15	494	433	10,9	45,3	7,8	13,3	23,0	22,0	72,8	76,7	4	2200	739	108	
15:45	431	407	15,5	36,1	12,3	23,6	23,1	21,4	74,8	78,6	2	2200	685	54	
16:00	515	413	41,2	48,8	13,0	25,4	23,3	21,5	74,6	77,8	35	2200	1576	945	Volta das crianças após pintura
16:15	734	400	252,1	37,2	23,6	22,6	23,4	21,4	69,7	77,8	51	2200	2008	1377	Alta movimentação
16:30	1052		249,0		21,6		23,4		67,6		87	2200	2980	2349	
16:45	1147		95,6		23,6		23,6		66,9		87	2200	2980	2349	
17:00	1255		120,6		17,6		23,8		63,4		87	2200	2980	2349	Movimentação média
17:15	1106	430	513,2	40,0	23,7	22,1	23,3	20,8	63,4	79,8	40	2200	1711	1080	Saída das crianças e começo da arrumação da sala as 17h03, as 17h10 começaram a varrer a sala
17:30	865		246,9		20,0		22,9		71,8		21	2200	1198	567	Sala arrumada as 17h25
17:35	726		119,6		16,1		22,6		73,3		7	2200	820	189	Reunião pós oficina
17:40	643		78,1		14,5		23,7		71,8		15	2200	1036	405	Reunião pós oficina
17:45	625		61,8		14,2		23,4		73,8		23	2200	1252	621	Reunião pós oficina
17:50	596		37,7		12,9		23,4		74,3		30	2200	1441	810	Reunião pós oficina

An.C.3. Oficina de Carrinhos de Rolimã - Edição de 2018

Tabela An.C.5: Dados das medições Oficina de Carrinhos de Rolimã, edição de 2018, 1º Dia, 21/10/2018, Manhã

HORA	Temperatura - TBS (°C)		Umidade Relativa (%)		CO ₂ (ppm)		PM10 (µg/m ³)		PM2,5 (µg/m ³)		PM1,0 (µg/m ³)		Observações			
	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Ocupantes	Registro de eventos	Vazão de ar externo aproximada (m ³ /h)	Vazão aproximada por pessoa (m ³ /h)
07:15	21,1		62,6		384		42,5		39,3		35,7		1	Repouso total - ACD	0	0
07:24	21,3	18,3	62,2	67,2	384	360	33,2	74,3	17,4	13,9	12,1	4,4	1	Repouso total - ACD	0	0
07:44	21,1	18,3	62,6	67,2	385	366	27,2	71,8	8,4	13,1	2,9	3,7	1	Repouso total - ACD	0	0
07:57	21,4		60,6		392		33,3		8,6		2,9		3	Repouso- Mov. Dist. Sensor-ACD	0	0
08:05	21,9	18,3	59,0	67,2	404	366	35,7	68,9	8,8	12,9	3,0	4,0	3	Repouso- Mov. Dist. Sensor-ACD	0	0
08:21	22,1		59,4		414		37,7		9,1		3,2		1	Repouso- Mov. Dist. Sensor-ACD	0	0
08:30	22,7		56,3		426		40,7		9,0		3,3		14	Repouso- Mov. Dist. Sensor-ACD	0	0
08:40	22,4	18,6	57,1	63,6	479	390	133,2	58,6	11,3	12,8	3,5	4,7	14	Aluno apagou a lousa-ACD	0	0
08:50	22,2		59,0		571		137,1		11,9		3,6		14	Repouso total -ACD	0	0
09:00	22,7		57,4		641		53,9		12,1		3,8		30	Monitores entrando na sala -ACD	0	0
09:10	23,2		56,1		686		116,8		11,9		3,9		30	Monitores entrando na sala -ACD	0	0
09:20	23,9	20,0	55,0	58,3	829	382	70,9	54,4	10,6	11,1	3,9	3,6	29	Monitores sentados-ACD	0	0
09:30	22,8		58,3		842		57,1		10,2		4,0		1	Repouso total - ACD	0	0
09:40	23,9		53,4		725		37,8		8,5		3,4		1	Repouso total - ACD	0	0
10:00	24,2	19,5	52,2	52,8	680	371	25,6	50,1	7,3	9,2	3,2	2,2	1	Repouso total - ACL	0	0
10:20	23,3		54,0		765		68,7		7,9		3,0		37	Crianças e monitores entrando-ACL	0	0
10:25	23,9	20,4	52,8	55,4	841	357	93,3	64,2	8,7	11,6	3,1	3,5	37	Crianças e monitores entrando-ACL	0	0
10:30	23,9		54,2		1010		81,6		8,9		3,1		38	Crianças e monitores entrando-ACL	0	0
10:40	24,7		53,2		1028		79,8		8,9		3,1		38	Crianças e monitores entrando-ACL	0	0
10:50	24,4		52,8		1160		120,2		9,9		3,2		38	Crianças se movimentando-ACL	0	0
11:00	24,5	20,2	55,6	53,3	1286	373	117,9	54,2	10,8	11,5	3,3	3,9	38	Crianças se movimentando-ACL	0	0
11:15	23,4		59,0		1493		118,2		11,2		3,4		38	Serragem (1 grupo)-ACL	0	0
11:25	23,9	21,2	58,1	50,9	1523	399	125,7	58,1	11,1	11,9	3,4	4,7	37	Lixamento (1 grupo)-ACL	0	0
11:35	23,9	21,0	59,5	52,5	1462	360	169,1	62,5	12,7	12,4	3,9	4,6	37	Serragem e lix. - vários grupos-ACL	0	0
11:45	22,9		58,0		1631		317,5		15,8		4,2		37	Serragem e lix. - vários grupos-ACL	0	0
11:55	23,6	21,2	53,2	50,4	1686	388	345,9	50,6	15,9	9,8	4,0	3,1	37	Groza e serrag./saida almoço-ACL	0	0

Tabela An.C.6: Dados das medições Oficina de Carrinhos de Rolimã, edição de 2018, 1º Dia, 21/10/2018, Tarde

HORA	Temperatura - TBS (°C)		Umidade Relativa (%)		CO ₂ (ppm)		PM10 (µg/m ³)		PM2,5 (µg/m ³)		PM1,0 (µg/m ³)		Observações			
	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Ocupantes	Registro de eventos	Vazão de ar externo aproximada (m ³ /h)	Vazão aproximada por pessoa (m ³ /h)
13:20	23,5		50,4		843		19,8		5,8		2,6		1	Sala vazia - ACL	0	0
13:30	23,9		47,6		790		18,1		5,7		2,4		1	Sala vazia - ACL	0	0
13:40	24,4	22,2	46,8	44,6	739	335	26,3	44,5	5,7	8,6	2,5	2,4	1	Sala vazia - ACL	0	0
13:50	23,9		46,5		687		23,2		5,5		2,5		1	Sala vazia - ACL	0	0
14:00	24,1	22,1	46,6	45,8	639	352	17,1	43,5	5,4	8,9	2,4	2,5	7	Sala vazia - ACL	0	0
14:15	24,0		46,0		732		65,0		5,9		2,3		20	Ret. almoço/Mont.(pouca mov.)-ACL	0	0
14:25	24,7	21,9	45,3	44,9	909	395	227,9	41,2	9,2	8,6	2,5	2,4	36	Serragem intensa - ACL	0	0
14:35	23,9		48,1		1075		350,0		12,5		2,7		35	Serragem intensa - ACL	0	0
14:45	24,4	21,6	45,8	43,9	1217	390	377,4	43,8	13,5	8,2	2,7	2,2	35	Serragem intensa - ACL	0	0
14:55	23,6		48,7		1264		389,4		15,2		2,9		32	Serragem intensa - ACL	0	0
15:05	24,2	21,6	43,3	44,9	1252	382	388,2	28,7	14,9	7,7	2,7	2,1	33	Serragem intensa - ACL	1100	33
15:15	23,1		48,1		1246		396,7		14,3		2,6		27	Serragem moderada - ACL	1100	41
15:25	23,9	21,3	44,7	46,2	1166	395	331,1	51,4	13,0	8,9	2,4	2,4	27	Serragem moderada - ACL	1100	41
15:35	23,2		47,9		1090		301,2		11,9		2,4		25	Serragem moderada - ACL	1100	44
15:45	23,7	21,0	47,3	49,8	1069	384	348,7	54,3	12,8	9,4	2,4	2,5	28	Serragem moderada - ACL	1100	39
15:55	22,9		49,5		962		347,0		12,2		2,4		33	Lixamento moderado - ACL	2200	67
16:05	23,4	20,6	47,7	49,3	888	374	282,1	56,7	10,0	9,3	2,2	2,5	32	Lixamento moderado - ACL	2200	69
16:15	22,8		50,0		800		318,0		9,9		2,2		28	Lixamento moderado - ACL	2200	79
16:25	22,6	20,6	49,5	49,2	805	442	333,1	54,9	10,5	8,9	2,2	2,4	26	Lixamento moderado - ACL	2200	85
16:35	22,3		50,5		787		286,5		8,8		2,0		27	Montagem-ACL	2200	81
16:45	23,0	19,9	49,2	49,2	784	385	214,0	47,5	8,6	8,9	2,0	2,2	38	Montagem-ACL	2200	58
16:55	22,2		50,8		774		234,7		7,5		2,0		35	Montagem-ACL	2200	63
17:05	23,1	19,1	48,5	51,2	807	365	233,5	51,8	7,6	8,9	2,0	2,1	29	Finalização das atividades-ACL	2200	76
17:15	21,4		51,2		652		141,9		6,1		1,8		2	Sala vazia - ACL	2200	1100
17:25	22,8	19,1	46,0	52,0	538	373	63,7	43,6	4,3	7,8	1,5	1,9	2	Sala vazia - ACL	2200	1100
17:39	22,2		46,4		488		23,8		2,6		1,3		1	Sala vazia - ACL	2200	2200

Tabela An.C.7: Dados das medições Oficina de Carrinhos de Rolimã, edição de 2018, 2º Dia, 22/10/2018, Manhã

HORA	Temperatura - TBS (°C)		Umidade Relativa (%)		CO ₂ (ppm)		PM10 (µg/m ³)		PM2,5 (µg/m ³)		PM1,0 (µg/m ³)		Observações			
	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Ocupantes	Registro de eventos	Vazão de ar externo aproximada (m ³ /h)	Vazão aproximada por pessoa (m ³ /h)
08:50	21,9	18,1	54,0	63,0	527	370	103,0	36,6	7,1	6,7	2,6	2,4	16	Monitores Sentados Conversando	2200	138
09:00	21,4		56,0		592		159,0		7,3		2,3		26	Chegada das Crianças	0	0
09:10	22,4	19,9	55,0	60,0	802	395	294,0	43,8	9,1	7,0	2,3	2,3	33	Lixamento/Montagem	0	0
09:20	21,9		62,0		1075		386,0		11,6		2,5		39	Serra/Lixamento/Montagem	0	0
09:30	22,9	19,7	59,0	60,0	1174	387	403,0	27,7	12,4	5,6	2,5	2,0	36	Serra/Lixamento/Montagem	0	0
09:40	21,7		65,0		1284		487,0		15,2		2,7		34	Serra/Lixamento/Furação/Mont.	0	0
09:50	23,6	20,5	60,0	56,0	1395	396	469,0	20,3	15,3	3,8	2,6	1,3	31	Lixamento/Furação/Montagem	0	0
10:00	22,2		61,0		1511		365,0		14,5		2,4		32	Furação/Montagem	0	0
10:10	23,1	20,8	56,0	54,0	1454	397	279,0	18,5	12,6	3,7	2,0	1,1	34	Furação/Montagem	1100	32
10:20	22,2		59,0		1405		234,0		10,6		2,0		33	Furação/Montagem	1100	33
10:30	23,2	20,6	58,0	56,0	1340	410	310,0	22,0	11,3	4,5	1,9	1,5	35	Serra/Furação/Montagem	1100	31
10:40	22,4		62,0		1302		288,0		10,4		1,8		30	Furação/Montagem	1100	37
10:50	22,8	19,6	59,0	57,0	1263	375	251,0	24,0	9,4	5,5	1,9	2,0	28	Furação/Montagem	1100	39
11:00	22,2		60,0		1154		233,0		8,8		1,8		34	Furação/Montagem	1100	32
11:10	23,0	20,7	58,0	55,0	1046	238	265,0	22,4	8,7	5,2	1,8	1,8	34	Serra/Furação/Montagem	2200	65
11:20	22,3		59,0		958		296,0		8,7		1,7		32	Serra/Furação/Montagem	2200	69
11:30	22,8	20,9	55,0	55,0	895	391	248,0	22,2	7,5	5,0	1,8	1,7	34	Lixamento/Montagem	2200	65
11:40	22,6		55,0		865		292,0		8,3		1,7		31	Lixamento/Montagem	2200	71
11:50	23,5	21,7	53,0	51,0	851	375	303,0	20,7	8,0	4,2	1,6	1,5	26	Serra/Furação/Montagem	2200	85
12:00	23,0		53,0		802		255,0		7,3		1,5		32	Saída para o Almoço	2200	69

Anexo D – Tabelas de Medições Oficinas de Brinquedos

No presente anexo, são apresentados os dados monitorados para cada parâmetros durante as diferentes edições das Oficinas de Brinquedos, utilizados como base para a construção dos gráficos de variação dos parâmetros detalhados no Item 5.1.2.

As Oficinas de Brinquedos tiveram os parâmetros de qualidade do ar monitorados durante as edições realizadas entre os anos de 2016 e 2019, tendo sido acompanhada, como parte dos ensaios do presente trabalho, a edição realizada em 2019. Os dados detalhados dos ensaios realizados nas edições entre 2016 e 2018, utilizados como base de comparação para a última edição, estão disponíveis em Fakhoury (2017), Dal Pogeto et al. (2018) e Guilhotti (2021).

Todas as medições ocorreram no ambiente da Sala de Aula A2, localizado no departamento de engenharia mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), cujos dados construtivos podem ser verificados no item 4.3.1.

An.D.1. Oficina de Brinquedos - Edição de 2016

Tabela An.D.1: Dados das medições Oficina de Brinquedos, edição de 2016, 21/05/2016 (Fakhoury, 2017)

Hora	TBS (°C)		UR (%)		CO ₂ (ppm)		PM ₁₀ (ug/m ³)		PM _{2,5} (ug/m ³)		Observações			
	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Ocupantes	Geral	Vazão de ar externo aproximada (m ³ /h)	Vazão aproximada por pessoa (m ³ /h)
10h00	22,1	22,2	75,6	76,2	509	409	24,6	12,3	4,8	3,9	3	unidades 1 e 3 em operação	1100	367
10h10	22,2	22,4	76,3	71,6	494	447	26,1	14,6	4,2	3,8	3		1100	367
10h20	22,1	21,6	71,9	71,6	474	410	22,9	12,3	3,6	3,3	4		1100	275
10h30	21,9	20,5	72,7	76,7	466	407	22,1	14,4	3,4	4,1	3		1100	367
10h40	21,8	23,1	73,1	78,4	467	454	19,9	14,2	3,2	4	1		1100	1100
10h50	22,1	20,6	73	76,5	470	409	10,9	16,4	2,8	4,5	1		1100	1100
11h00	21,8	20,6	73,9	76,5	457	403	11,9	12,9	2,8	3,8	2		1100	550
11h10	22,3	20,7	72,9	76,8	562	397	70,9	14,3	4,9	3,9	42	11h05 entrada dos alunos	1100	26
11h20	22,9	19,6	72,4	80,2	680	415	48	15,1	5,5	4	43		1100	26
11h30	22,5	21,2	75	77,2	812	418	47,9	14,5	5,3	3,8	43	11h35 início chuva forte	1100	26
11h40	22,8	20,2	75,9	76,4	853	418	58,9	33,2	8,4	13,1	44		1100	25
11h50	23	21,5	75,7	77,8	880	403	54,6	34,2	8,3	12,1	42		1100	26
12h00	23,3	21,4	73,5	77,1	820	409	55,9	32,3	8,3	10,3	41		1100	27
12h10	22,9	21,5	78,3	76,8	798	413	54,2	29,8	8,7	11,4	43		1100	26
12h20	22,8	19,7	74,8	81,4	647	418	47,6	30,4	8,6	13,4	2	12h15 saída para almoço	1100	550
INTERVALO DO ALMOÇO														
13h20	23,7	20,2	76,1	79,9	778	423	54,3	27,1	8,5	12,5	42		1100	26
13h30	23,1	21,5	75,4	78,7	789	432	66,6	25,2	9,3	10,4	43		1100	26
13h40	22,9	20,5	75,5	79,8	812	424	63,8	19,3	8,6	8,3	42	11h35 término chuva	1100	26
13h50	23,2	20,5	75,3	78,5	845	427	60,7	16,3	7,9	6,11	44		1100	25
14h00	22,8	19,9	76,6	79,9	904	417	137,4	18,5	9,9	8,1	44	14h00 início da lixação	1100	25
14h05	-	-	-	-	-	-	522,3	18,4	23,1	7,5	44		1100	25
14h10	23,2	20,1	75,9	79,8	875	434	588,9	18,4	25,7	6,9	44		1100	25
14h15	-	-	-	-	-	-	710,3	18	28,9	7	45		1100	24
14h20	22,4	20,8	77,5	78,1	887	424	715,5	17,6	29,3	7,2	45		1658	37
14h30	23,6	21,8	74,3	75,3	886	425	352,4	14,3	19,9	5,9	45	14h25 unidades 1, 2 e 3	1658	37
14h40	23,9	22,7	72,1	71,6	819	421	165,7	13,3	11,9	5,6	44		1658	38
14h50	23,8	21,2	74,2	76,4	807	444	144,3	16,6	9,9	5,9	44		1658	38
15h00	23,6	21,4	73,4	75,8	795	439	98,4	12,9	7,7	5,7	44	15h05 término lixação e início furação	1658	38
15h10	23,7	21,8	74,4	74,3	788	449	85,7	14,5	6,8	6,4	46		1100	24
15h20	23,5	21,7	75,1	74,3	795	452	83,1	13,4	6,6	5,6	45	15h15 unidades 1 e 3	1100	24
15h30	23,5	21,9	73,9	74,9	830	432	87,1	14,4	6,9	6,5	44		1100	25
15h40	23,1	21,6	76,3	74,4	873	445	103,3	14,8	7,4	6,7	44		1100	25
15h50	23,9	21,9	73,7	75,3	877	438	149,8	14,7	8,8	6,4	46		1100	24
16h00	21,5	21,7	75,7	74,9	871	441	159,8	14,3	9,1	6,5	46		1100	24

An.D.2. Oficina de Brinquedos - Edição de 2017

Tabela An.D.2: Dados das medições Oficina de Brinquedos, edição de 2017, 10/06/2017 (Dal Pogeto, 2018)

Horário	CO2 [ppm]		PM10 [µg/m³]		PM2,5 [µg/m³]		TBS [°C]		UR [%]		N° de pessoas	Vazão [m³/h]	ABNT Nível 3 [m³/h]	Portaria 3523 MS [m³/h]	Comentários
	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo					
10:30	506	402	17,6	9,3	3,9	5,4	21,9	16,1	47,6	58,2	6	550	793	162	Unidade 3 ligada
10:40	507	404	979	8,8	47,5	4,9	21	16	49,9	58,9	6	550	793	162	10h35 Início corte de madeira
10:50	496	398	966,3	20,3	47,4	9,1	21,7	15,4	48,2	57,6	6	550	793	162	Lixamento
11:00	584	399	836,2	19,4	53	8,6	21,3	17	49,6	55	8	550	847	216	furação
11:10	583		412,3		39,3		21,6		49,9		7	550	820	189	furação
11:20	594	398	424,5	26,6	33,8	9,5	22,4	17,5	47,1	54,6	10	550	901	270	furação
11:30	630		266,3		24,7		22,7		49,9		8	550	847	216	montagem
11:40	810	398	258,6	16,8	21,2	5,2	23,3	17,7	46,8	50,4	65	550	2386	1755	entrada das crianças
11:50	1050		286,4		20,4		23,2		51,2		70	550	2521	1890	aula teórica
12:00	1160	400	195,4	15,5	16,8	6,5	23,8	17,1	47,6	52,2	70	1100	2521	1890	11h52 unidade 2 ligada
12:10	1260		172		12,8		23,5		48		70	1100	2521	1890	
12:20	1250	400	136,1	16,1	10,6	6,6	24,3	18,3	46,2	46,6	70	1100	2521	1890	
12:30	1264		108,6		9,3		23,5		47,9		70	1100	2521	1890	
12:40	1250	414	154,3	29,7	9,9	8,1	24,4	18,3	45,1	46,5	35	1100	1576	945	saida das crianças
14:10	815	405	98,6	16,16	6	4,4	23,6	18,9	40,3	45,5	70	1100	2521	1890	todos sentados
14:20	996		112,23		7,2		22,6		44,5		70	1100	2521	1890	atividade e movimentação média
14:30	1097	428	438,4	15,8	12,4	3,5	24,1	20	41,7	41,4	70	1100	2521	1890	Lixação madeira
14:40	1280		1319,2		46,5		23,5		44,7		70	1100	2521	1890	Lixação madeira
14:50	1365	411	1093,9	13,5	42,1	3,3	24,1	19,7	44,6	37,7	70	1100	2521	1890	Lixação madeira
15:00	1213		732,8		32,6		23,7		44,5		70	2200	2521	1890	Lixação, pouca
15:10	1183	398	377,2	14,9	20,72	3,6	23,8	19,6	43	37,8	70	2200	2521	1890	Fixação com parafusadeira e movimentação média
15:20	1184		245,5		13,4		23,4		42,5		70	2200	2521	1890	Movimentação média
15:30	1180		180,3		10		23,5		41,5		70	2200	2521	1890	atividade média
15:40	1165	404	211,8	13,61	14,2	3,8	23,3	19,2	41,8	36,3	70	2200	2521	1890	Furação + cortes
15:50	1130		149,5		9,8		22,5		43		70	2200	2521	1890	
16:00	1153		146,6		8,6		23,4		41,2		70	2200	2521	1890	
17:00	1180	422	167,4	16,7	8	4,3	22,9	18,7	43,3	40,6	70	2200	2521	1890	Furação + montagem

An.D.3. Oficina de Brinquedos - Edição de 2018

Tabela An.D.3: Dados das medições Oficina de Brinquedos, edição de 2018, 09/10/2018, Manhã (Guilhotti, 2021)

HORA	Temperatura - TBS (°C)		Umidade Relativa (%)		CO ₂ (ppm)		PM10 (µg/m ³)		PM2,5 (µg/m ³)		PM1,0 (µg/m ³)		Observações			
	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Ocupantes	Registro de eventos	Vazão de ar externo aproximada (m ³ /h)	Vazão aproximada por pessoa (m ³ /h)
10:00	21,1		61,3		509		69,5		17,6		13,4		2	preparação da sala	1100	550
10:25	20,6	19,4	64,6	65,5	626	377	97,0	69,5	26,0	32,8	19,9	25,3	64	Projeto-aluno sentados	1100	17
10:30	22,0	19,4	61,7	65,9	838	393	105,4	66,4	24,0	29,7	18,0	23,1	64	Projeto-aluno sentados	1100	17
10:45	20,8	19,5	65,8	66,3	1100	401	140,9	98,1	18,6	38,8	12,9	28,7	64	Projeto-aluno sentados	1100	17
11:00	21,4	19,2	68,0	66,5	1346	394	157,8	118,4	20,4	45,1	14,3	33,6	64	alguns lixamentos + fabric.	1100	17
11:15	21,4	20,0	69,0	65,6	1406	436	220,7	105,4	23,3	41,4	15,3	41,6	64	alguns lixamentos + fabric.	1100	17
11:30	22,9	19,6	65,2	67,0	1467	417	164,8	97,7	22,7	38,8	15,5	29,0	64	movimentação ocupantes	1100	17
11:35							79,1		36,4		27,3		64	movimentação ocupantes	1100	17
11:45	22,7	20,0	67,7	64,3	1718	408	122,4	106,2	22,0	40,2	15,6	30,5	64	sentados em fabricação	1100	17
11:52	22,8		68,5		1536		228,9		24,0		15,7		64	sentados em fabricação	1100	17
11:56	23,7		64,8		1600		350,6		25,9		15,6		64	sentados em fabricação	1100	17
12:00	24,0	20,8	65,2	63,8	1588	422	441,2	90,7	26,8	34,1	15,5	26,4	64	lixamento madeira	1100	17
12:08	22,0		71,6		1602		844,0		35,5		15,4		64	lixamento madeira	1100	17
12:11	23,1		68,2		1619		836,0		35,5		15,0		64	lixamento madeira	1100	17
12:12	23,5		67,3		1600		857,0		36,4		15,3		64	lixamento madeira	1100	17
12:15	24,0	20,9	64,5	62,8	1632	424	929,0	80,7	38,1	34,9	15,5	27,2	64	lixamento madeira	2200	34
12:25	22,7	20,9	67,0	62,5	1312	416	837,0	92,3	38,7	37,5	17,2	29,5	64	lixamento madeira	2200	34
12:27	23,5		63,3		1233		785,2		37,7		17,3		64	alunos saindo da sala	2200	34
12:29	24,0		60,0		1151		716,0		36,6		17,4		30	alunos saindo da sala	2200	73

Tabela An.D.4: Dados das medições Oficina de Brinquedos, edição de 2018, 09/10/2018, Tarde (Guilhotti, 2021)

HORA	Temperatura - TBS (°C)		Umidade Relativa (%)		CO ₂ (ppm)		PM10 (µg/m ³)		PM2,5 (µg/m ³)		PM1,0 (µg/m ³)		Observações			
	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Ocupantes	Registro de eventos	Vazão de ar externo aproximada (m ³ /h)	Vazão aproximada por pessoa (m ³ /h)
13:42	23,3		59,3		669		131,0		23,8		19,1		15	alunos entrando na sala	2200	147
13:45	23,6	21,2	58,7	64,1	728	396	158,3	93,3	24,3	44,1	19,2	33,8	64	alunos sentados lixando	2200	34
14:00	23,3	21,4	61,8	63,7	857	394	246,0	105,5	27,9	43,6	20,8	33,0	64	montagem	2200	34
14:15	23,6	21,6	61,4	63,7	941	398	180,8	132,1	27,3	46,9	20,8	35,4	64	montagem	2200	34
14:19							158,0		26,7		20,6		64	montagem	2200	34
14:21	24,4		60,5		1062		155,2		26,8		20,8		64	montagem	2200	34
14:30	23,2	21,4	65,3	63,9	1094	415	126,7	102,8	28,4	47,2	22,8	36,0	64	montagem e furação	2200	34
14:33	23,7		64,0		1096		128,1		28,4		22,9		64	montagem e furação	2200	34
14:45	23,2	21,6	66,2	62,5	1146	434	122,0	110,9	29,2	51,0	23,7	39,6	64	montagem e furação	2200	34
14:50	24,5		62,3		1117		125,0		30,0		24,1		64	montagem e furação	2200	34
15:00	23,6	21,5	65,6	64,3	1126	469	110,4	125,2	32,9	51,4	27,2	39,6	63	montagem e furação	2200	35
15:09	23,2		62,3		1079		105,1		32,7		27,1		63	montagem e furação	2200	35
15:15	22,6	21,4	68,6	63,7	1082	428	107,1	127,4	35,3	56,0	29,4	43,4	63	montagem e furação	2200	35
15:20	23,1		62,8		1091		103,2		34,7		28,9		63	montagem e furação	2200	35
15:30	22,6	21,3	66,8	64,0	1080	424	111,6	120,4	35,6	54,1	29,6	42,0	63	montagem e furação	2200	35
15:45	22,3	21,0	67,6	66,4	1104	430	107,5	107,2	36,1	51,5	30,0	39,2	62	montagem e furação	2200	35
15:50	22,2		67,5		1078		99,5		36,2		30,3		62	montagem e furação	2200	35
15:55	23,0		67,1		1106		101,9		36,1		30,2		62	montagem e furação	2200	35
16:00	23,4	21,1	66,8	66,5	1111	438	101,8	138,0	36,1	51,6	30,1	38,9	62	montagem e furação	2200	35
16:06	21,2		70,9		1080		94,6		35,6		29,8		62	montagem e furação	2200	35
16:10	23,2		68,1		1146		96,4		35,5		29,6		62	montagem e furação	2200	35
16:15	22,9	21,2	66,8	65,5	1118	420	97,8	114,4	35,5	51,6	29,6	38,9	62	montagem e furação	2200	35
16:22	22,9	21,2	64,9	65,7	1100	429	101,1	123,5	36,5	52,2	30,1	38,4	62	montagem e furação	2200	35
16:30	23,1		67,6		1110		102,0		35,7		29,4		62	montagem e furação	2200	35
16:38	22,7		66,6		1160		97,5		35,2		29,0		62	montagem e furação	2200	35
16:45	22,9	20,4	68,8	69,4	1127	405	99,4	129,6	35,0	50,2	28,8	36,6	62	montagem e furação	2200	35
16:54	23,0		71,0		1129		99,9		33,9		27,6		62	montagem e furação	2200	35
17:00	23,1	20,7	69,7	69,6	1134	429	100,2	128,3	33,6	49,6	27,3	35,4	62	finalização montagem	2200	35
17:07	22,2		74,8		1166		100,5		32,7		26,3		62	finalização montagem	2200	35
17:15	23,2	20,4	69,3	70,0	1138	400	102,9	141,0	32,1	40,6	25,8	34,1	62	finalização mont. testes	2200	35
17:21	22,3		72,8		1121		110,0		31,0		24,8		62	maioria finalizou mont. testes	2200	35
17:30	22,9	20,1	69,8	71,4	1104	411	112,8	126,3	30,9	49,3	24,5	33,8	62	maioria finalizou mont. testes	2200	35
17:34	22,6		71,3		1116		148,5		30,5		23,6		62	alunos sentados trab. Concluído	2200	35
17:45	23,8	20,0	68,3	70,9	1087	413	131,4	130,0	30,2	49,1	23,4	33,6	62	alunos sentados trab. Concluído	2200	35
17:53	23,0		72,1		1067		86,0		28,9		23,2		62	saindo da sala	2200	35
18:00	22,8	19,7	67,5	72,7	992	431	107,5	133,4	29,3	49,6	23,1	33,4	21	arrumando a sala	2200	105
18:15	21,7	18,8	70,0	75,9	789	414	158,0	155,0	30,6	47,0	23,0	31,9	16	arrumando as cadeiras	2200	138

An.D.4. Oficina de Brinquedos - Edição de 2019

Tabela An.D.5: Dados das medições Oficina de Brinquedos, edição de 2019, 01/06/2019, Manhã.

HORA	Ponto Medido	Temperatura - TBS (°C)		Umidade Relativa (%)		CO ₂ (ppm)		PM10 (µg/m ³)		PM2,5 (µg/m ³)		PM1,0 (µg/m ³)		Observações			
		Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Ocupantes	Registro de eventos	Vazão de ar externo aproximada (m ³ /h)	Vazão aproximada por pessoa (m ³ /h)
08:30	M	23,1		74,0		428		12,8		4,9		3,2		2	Abertura da Sala - Repouso - ACD	0	0
08:37	LD	23,1		74,3		442		13,0		5,3		3,6		2	Repouso - ACD	0	0
08:45	LE	23,1		74,2		453		13,5		5,1		3,4		2	Repouso - ACD	0	0
08:53	CE	23,1		74,7		469		15,5		5,0		3,3		2	Repouso - ACD	0	0
08:58	CD	23,1		74,8		478		15,8		5,5		3,7		2	Repouso - ACD	0	0
09:00	M	23,4		73,8		483		12,3		5,1		3,4		7	Entrada de Monitores - Ligado AC	0	0
09:20	Ext		22,7		74,9		387		37,3		13,5		10,1	1	Saída de Monitores - Repouso- ACL	0	0
09:30	M	23,7		73,8		545		11,6		5,2		3,4		1	Repouso- ACL	550	550
09:40	M/Ext	24,4	23,1	71,6	75,9	523	379	9,5	31,2	5,0	10,1	3,6	7,1	1	Repouso- ACL	550	550
09:50	M	24,1		73,0		505		8,3		4,7		3,5		1	Repouso- ACL	550	550
10:00	M/Ext	24,6	23,8	71,6	73,8	504	374	7,3	33,2	4,7	9,9	3,7	7,0	1	Repouso- ACL	550	550
10:10	M	24,8		70,5		488		6,8		4,3		3,5		1	Repouso- ACL	550	550
10:14	LD	24,6		70,9		498		6,3		4,2		3,4		1	Repouso- ACL	550	550
10:17	CD	24,6		71,1		497		6,4		4,1		3,4		1	Repouso- ACL	550	550
10:20	M	25,0		69,8		486		6,9		4,1		3,3		1	Repouso- ACL	550	550
10:24	LE	24,9		69,9		476		5,8		4,0		3,3		1	Repouso- ACL	550	550
10:27	CE	25,0		69,6		477		5,3		4,0		3,2		1	Repouso- ACL	550	550
10:30	M/Ext	25,2	23,9	68,9	70,4	472	372	6,4	47,6	3,9	8,6	3,2	5,1	1	Repouso- ACL	550	550
10:40	M	24,2		68,9		487		6,1		3,7		3,2		2	Repouso- ACL	550	275
10:50	M/Ext	24,3	23,6	69,8	72,1	496	396	8,4	58,3	4,0	10,5	3,2	6,2	1	Repouso- ACL	550	550
11:00	M	24,6		67,4		704		26,2		4,6		3,2		49	Entrada das crianças e monitores	550	11
11:10	M/Ext	24,9	24,1	65,3	68,7	952	389	33,5	61,5	5,0	10,6	3,3	6,4	54	Pessoas sentadas / algumas em pé	550	10
11:20	M	24,9		63,4		1133		38,2		5,4		3,5		54	Pessoas sentadas / algumas em pé	550	10
11:30	M/Ext	24,7	24,3	60,9	69,3	1297	393	44,7	60,8	5,8	10,4	3,5	6,3	52	Início de garoa fina	1100	21

Tabela An.D.6: Dados das medições Oficina de Brinquedos, edição de 2019, 01/06/2019, Manhã/Tarde.

HORA	Ponto Medido	Temperatura - TBS (°C)		Umidade Relativa (%)		CO ₂ (ppm)		PM10 (µg/m ³)		PM2,5 (µg/m ³)		PM1,0 (µg/m ³)		Observações			
		Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Ocupantes	Registro de eventos	Vazão de ar externo aproximada (m ³ /h)	Vazão aproximada por pessoa (m ³ /h)
11:40	M	24,2		61,1		1321		35,4		5,8		3,7		53	Metade sentada / metade em pé	1100	21
11:44	LD	24,4		67,7		1386		41,9		6,0		3,7		53	Metade sentada / metade em pé	1100	21
11:47	CD	24,5		60,9		1436		35,8		6,2		3,7		53	Metade sentada / metade em pé	1100	21
11:50	M	24,6		59,8		1402		43,5		6,3		4,0		50	Metade sentada / metade em pé	1100	22
11:54	LE	24,4		62,9		1366		38,3		6,6		4,1		50	Metade sentada / metade em pé	1100	22
11:57	CE	23,9		61,1		1360		37,4		6,4		4,2		50	Metade sentada / metade em pé	1100	22
12:00	M/Ext	24,1	23,7	61,1	70,9	1453	411	31,2	62,3	6,4	12,1	4,1	7,5	50	Metade sentada / metade em pé	1100	22
12:10	M	24,4		63,4		1427		28,0		6,2		4,3		48	Metade sentada / metade em pé	1650	34
12:20	M/Ext	24,4	23,7	65,9	75,7	1324	426	39,5	59,7	6,6	12,5	4,6	7,8	48	Metade sentada / metade em pé	1650	34
12:30	M	23,8		65,2		1192		30,0		6,9		4,9		49	Metade sentada / metade em pé	1650	34
12:40	M/Ext	24,3	23,9	64,3	71,8	1161	420	30,1	65,6	7,0	12,0	5,0	7,2	51	Garoa mais forte	1650	32
12:50	M	24,0		63,0		1133		37,5		7,1		4,9		51	Saída dos ocupantes	1650	32
14:10	M	24,8		74,8		614		34,7		5,9		4,6		48	Retorno ocupantes / fabricação	1650	34
14:20	M/Ext	24,8	23,2	41,5	77,9	896	381	277,1	41,0	10,0	11,9	4,8	7,7	50	Lixamento intenso	1650	33
14:30	M	23,9		74,1		990		450,8		13,2		4,9		49	Lixamento intenso	1650	34
14:40	M/Ext	24,2	23,2	70,1	78,7	1143	393	776,6	44,1	21,7	12,5	5,5	8,2	49	Lixamento intenso	1650	34
14:50	M	23,7		71,2		1278		686,7		25,5		6,0		45	Lixamento intenso	1650	37
15:00	M/Ext	24,5	22,8	72,0	79,0	1332	399	485,8	46,1	23,1	13,2	6,0	8,8	52	Furação / Lixamento	1650	32
15:10	M	24,0		73,6		1270		263,6		17,9		5,8		52	Furação / Lixamento	1650	32
15:13	LD	24,4		72,6		1312		221,4		17,2		5,7		52	Furação / Lixamento	1650	32
15:16	CD	24,5		72,7		1310		188,0		15,3		5,8		52	Furação / Lixamento	1650	32
15:20	M	24,5		70,4		1269		146,2		14,0		6,0		51	Furação / Lixamento	1650	32
15:23	LE	23,5		72,2		1254		129,4		12,5		5,8		51	Furação / Lixamento	1650	32
15:26	CE	23,4		73,6		1239		106,4		11,9		5,9		51	Furação / Lixamento	1650	32
15:30	M/Ext	23,9	23,0	72,6	76,5	1275,0	401	105	52,1	11,9	13,0	6,0	8,4	48	Furação / Lixamento	1650	34

Tabela An.D.7: Dados das medições Oficina de Brinquedos, edição de 2019, 01/06/2019, Tarde.

HORA	Ponto Medido	Temperatura - TBS (°C)		Umidade Relativa (%)		CO ₂ (ppm)		PM10 (µg/m ³)		PM2,5 (µg/m ³)		PM1,0 (µg/m ³)		Observações			
		Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Ocupantes	Registro de eventos	Vazão de ar externo aproximada (m ³ /h)	Vazão aproximada por pessoa (m ³ /h)
15:40	M	23,6		71,9		1236		101,7		10,6		5,8		45	Furação / Finalização	1650	37
15:50	M/Ext	24,6	23,2	71,5	75,7	1246	400	80,7	79,5	9,5	13,0	5,7	8,6	48	Furação / Finalização	1650	34
16:00	M	24,0		72,8		1228		79,5		8,9		5,7		46	Furação / Finalização	1650	36
16:10	M/Ext	24,0	23,1	69,1	75,6	1242	414	70,7	38,3	8,2	10,8	5,5	7,4	50	Furação / Finalização	1650	33
16:20	M	23,7		74,8		1211		71,7		8,2		5,5		51	Furação / Finalização	1650	32
16:30	M/Ext	23,8	22,7	68,1	75,2	1264	395	65,6	45,3	7,7	11,4	5,3	7,6	48	Furação / Finalização	1650	34
16:40	M	23,6		73,3		1238		75,3		7,9		5,4		46	Furação / Finalização	1650	36
16:50	M/Ext	24,0	22,6	70,5	74,1	1253	417	69,9	37,3	7,7	9,1	5,0	6,0	45	Furação / Finalização	1650	37
17:00	M	23,7		72,9		1214		61,6		7,0		4,9		47	Furação / Finalização	1650	35
17:10	M/Ext	24,2	22,4	70,2	75,6	1224	393	70,7	30,6	6,9	8,0	4,6	5,5	48	Finalização / Montagem	1650	34
17:20	M	23,4		71,3		1209		49,3		6,2		4,4		49	Finalização / Montagem	1650	34
17:30	M/Ext	24,3	22,7	70,8	75,7	1263	417	63,5	28,1	6,2	6,7	4,0	4,6	54	Finalização / Montagem	1650	31
17:40	M	23,2		74,6		1298		67,4		5,9		3,8		50	Finalização / Montagem	1650	33
17:50	M/Ext	23,9	21,6	69,7	78,2	1274	435	58,7	25,4	5,6	6,7	3,6	4,4	52	Finalização / Montagem	1650	32
18:00	M	23,5		76,0		1267		76,1		6,0		3,6		51	Finalização / Montagem	1650	32
18:10	M/Ext	24,3	21,1	73,2	80,3	1263	419	72,3	33,1	5,8	7,7	3,5	5,3	49	Finalização / Montagem	1650	34
18:20	M	23,1		76,2		1234		49,7		5,8		3,7		51	Finalização / Montagem	1650	32
18:30	M/Ext	23,7	21,4	73,7	79,4	1257	455	60,5	35,9	5,9	8,3	3,8	5,5	49	Entrega dos certificados	2200	45
18:40	M	23,6		77,4		1204		83,2		7,0		4,1		51	Organização dos materiais	2200	43
18:50	M	23,5		72,6		1157		79,3		6,4		4,0		49	Organização dos materiais	2200	45
19:00	M	24,2		74,4		1199		127,3		8,5		4,2		68	Foto final com todas as crianças	2200	32
19:10	M	23,7		75,9		1134		131,5		10,1		4,5		25	Saída das crianças	2200	88
19:20	M/Ext	23,5	21,3	76,6	79,2	1015	444	74,5	41,7	7,8	8,5	4,3	5,6	13	Desmontagem / Retirada das mesas	2200	169

Anexo E – Tabelas de Medições Experimento Varredor Pneumático

No presente anexo, são apresentados os dados monitorados para cada parâmetros durante o experimento realizado para avaliação do impacto da de processo de varrição pneumática sobre a qualidade do ar, realizado no dia 17/10/2020. Estes dados foram utilizados como base para a construção dos gráficos de variação dos parâmetros detalhados no Item 5.2.

Os parâmetros monitorados durante o experimento foram concentrações de CO₂, material particulado (PM_{0,5}, PM₁ e PM_{2,5}) e agentes microbiológicos (fungos viáveis). Foram também realizadas medições das condições termo-higrométricas (temperatura e umidade relativa) e meteorológicas (direção e velocidade do vento).

Todas as medições internas ocorreram no ambiente da Sala de Aula A2, localizado no departamento de engenharia mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), cujos dados construtivos podem ser verificados no item 4.3.1.

An.E.1. Posição do Soprador Pneumático

Tabela An.E.1: Dados das medições de distância do operador, Experimento Varredor Pneumático, 17/10/2020.

Identificação da medida		Condição de ensaio	
Número medida	Hora	Distância (m)	Registro de Eventos
1	08:11	46	
A1	08:49	119	
A2	09:04	86	
A3	09:22	76	
A4	09:37	55	Na linha da calçada (9:35)
A5	09:46	34	
A6	09:53	28	
A7	09:59	18	
A8	10:08	20	Pausa (10:10)
A9	10:20	3	Volta da Pausa (10:18)
A10	10:27	26	
A11	10:32	55	
A12	10:37	66	
A13	10:50	68	
A14	11:04	86	
A15	11:14	Pausa	Pausa (11:07)
A16	11:50	92	

An.E.2. Condições Meteorológicas

Tabela An.E.2: Dados das medições das condições meteorológicas, Experimento Varredor Pneumático, 17/10/2020.

Identificação da medida		Vento		Condição de Ensaio		
Número medida	Hora	Velocidade (Km/h)	Direção	Posição	Registro de eventos	Distância até a entrada de ar (m)
1	09:00	7	SE	1ªPo		35,5
2	09:15	4	L	2ªPo		13,9
3	09:30	5	SW	2ªPo		13,9
4	09:45	6	SE	2ªPo		13,9
5	10:00	5	SE	2ªPo		13,9
6	10:15	3	SW	2ªPo	Pausa do Soprador	13,9
7	10:30	3	SE	3ªPo		20,9
8	10:47	6	S	3ªPo		20,9
9	10:57	5	SE	3ªPo		20,9
10	11:07	3	SE	3ªPo		20,9
11	11:19	9	O	3ªPo		20,9
12	11:26	9	SE	3ªPo		20,9
13	11:32	3	SW	3ªPo	Perto da Entrada	20,9
14	11:40	3	SW	3ªPo		20,9

An.E.3. Concentrações de Particulados, de CO₂ e Parâmetros Psicrométricos

Tabela An.E.3: Dados das medições parâmetros, Experimento Varredor Pneumático, 17/10/2020, Ar Externo, Parte A.

Número medição	Horário	PM _{0,5} [µg/m³]	PM ₁ [µg/m³]	PM _{2,5} [µg/m³]	PM ₁₀ [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	TBS [°C]	UR [%]	Registro de eventos
24	08:55	1,77	2,69	7,02	36,08	363	19,14	70,5%	Condição inicial (arrumando equipamentos)
25	08:56	1,76	2,67	7,26	36,32	361	19,17	70,2%	Início atividades
26	08:57	1,72	2,57	7,07	31,1	359	19,08	71,1%	Início atividades
27	08:58	1,76	2,63	7,23	32,1	361	19,35	69,2%	Início atividades
36	09:12	2,09	3,01	7,6	34,71	373	19,34	69,1%	Início atividades
37	09:13	2,03	2,96	7,4	30,85	374	19,34	70,8%	Início atividades
38	09:14	2,05	3,01	7,82	49,46	376	19,35	70,0%	Início atividades
48	09:35	1,99	2,94	7,16	32,95	357	19,56	69,4%	Varição
49	09:36	1,99	2,88	7,16	34,95	355	19,64	68,4%	Varição
50	09:37	1,94	2,87	7,03	30,48	360	19,9	66,7%	Varição
51	09:38	2	2,92	6,97	44,9	359	19,81	67,3%	Varição
52	09:39	2,22	3,16	7,46	26,72	359	19,56	69,0%	Varição
53	09:40	2,21	3,17	7,21	31,58	357	19,8	68,4%	Varição
54	09:41	2,09	3	6,99	25,9	361	19,92	68,3%	Varição
55	09:42	2,1	3,03	7,21	33,34	363	20,18	66,3%	Varição
56	09:43	2,04	2,92	7,1	28,99	366	20,1	65,1%	Varição
57	09:45	2,23	3,16	7,16	34,46	364	20,16	65,4%	Varição
58	09:46	2,15	3,07	6,82	26,18	360	20,1	65,8%	Varição
59	09:47	2,3	3,29	7,49	30,11	359	20,14	65,5%	Varição
60	09:48	2,82	3,81	7,4	25,18	358	20,45	65,4%	Varição
61	09:49	2,63	3,61	6,97	24,15	356	20,08	65,3%	Varição
62	09:50	2,39	3,36	6,53	32,18	354	20,06	66,2%	Varição
63	09:58	2,37	3,52	7,75	30,76	355	20,33	67,2%	Varição
64	09:58	2,55	3,77	8,09	34,22	359	20,31	65,7%	Varição
65	09:59	2,49	3,66	8	32,28	370	20,12	65,5%	Varição
66	10:00	2,56	3,87	8,38	34,96	361	19,92	66,1%	Varição

Tabela An.E.4: Dados das medições parâmetros, Experimento Varredor Pneumático, 17/10/2020, Ar Externo, Parte B.

Número medição	Horário	PM _{0,5} [µg/m³]	PM ₁ [µg/m³]	PM _{2,5} [µg/m³]	PM ₁₀ [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	TBS [°C]	UR [%]	Registro de eventos
67	10:01	3,33	5,13	9,98	36,6	370	19,74	67,2%	Varrição
68	10:02	4,09	6,47	11,81	36,33	362	19,67	68,0%	Varrição
69	10:03	4,12	6,57	12,21	40,25	376	19,81	67,9%	Varrição
70	10:04	4,39	6,98	12,91	39,38	367	20,04	66,7%	Varrição
75	10:11	5,65	9,16	15,52	46,24	357	19,75	68,3%	Pausa na varrição
76	10:12	5,67	9,16	15,3	47,04	355	19,48	68,5%	Pausa na varrição
77	10:13	5,7	9,22	15,51	42,91	346	19,46	69,2%	Pausa na varrição
78	10:14	5,69	9,21	15,53	42,1	346	19,61	69,8%	Pausa na varrição
83	10:23	4,96	7,78	14,18	85,75	352	19,88	68,4%	Varrição
84	10:24	4,82	7,74	13,04	44,44	365	19,83	68,1%	Varrição
85	10:25	4,88	7,51	12,89	38,53	359	19,73	68,6%	Varrição
86	10:26	4,83	7,44	13,19	44,78	355	19,44	68,7%	Varrição
87	10:27	4,79	7,35	13,65	70,01	358	19,4	70,0%	Varrição
88	10:28	4,79	7,41	13,74	84,33	353	19,33	69,6%	Varrição
89	10:29	4,72	7,35	13,12	51,98	358	19,28	69,9%	Varrição
90	10:30	4,67	7,23	12,93	50,47	367	19,27	69,8%	Varrição
99	10:43	3,89	6,08	11,67	64,82	372	20,04	68,5%	Varrição
100	10:44	3,74	5,77	10,7	42,68	358	20,08	68,2%	Varrição
101	10:45	3,7	5,78	11,15	36,5	357	20,18	67,9%	Varrição
102	10:46	3,62	5,64	11,4	36,12	372	20,25	69,1%	Varrição
107	10:54	3,84	6	11,12	39,74	360	19,8	67,4%	Varrição
108	10:55	3,76	5,84	11,17	66,21	358	20,1	67,5%	Varrição
109	10:56	4,03	6,22	11,37	39,65	362	20,08	67,7%	Varrição
110	10:57	3,91	6,04	11,33	60,4	359	20,23	67,3%	Varrição
111	10:58	4,01	6,25	11,51	41,69	363	20,12	67,4%	Varrição
112	10:59	3,97	6,23	11,31	43,52	365	20,04	68,0%	Varrição
113	11:00	4,05	6,32	11,59	38,12	370	20,15	68,1%	Varrição
114	11:01	3,98	6,24	11,4	40,36	364	20,2	68,1%	Varrição
123	11:17	4,94	7,29	12,37	43,77	362	20,3	67,9%	Pausa na varrição
124	11:18	4,84	7,29	12,3	37,07	357	20,28	68,0%	Pausa na varrição
125	11:19	4,52	7,09	12,32	36,21	361	19,89	68,8%	Pausa na varrição
142	11:47	5,39	7,94	13,07	51,44	366	20,14	67,6%	Varrição
143	11:48	5,32	7,78	13,47	48,53	360	21,04	67,1%	Varrição
144	11:49	5,6	8,24	13,79	48,79	362	21,15	65,4%	Varrição
145	11:50	5,63	8,31	14,09	70,4	355	20,94	65,5%	Varrição

Tabela An.E.5: Dados das medições parâmetros, Experimento Varredor Pneumático, 17/10/2020, Ar Interior, Parte A.

Número medição	Horário	PM _{0,5} [µg/m ³]	PM ₁ [µg/m ³]	PM _{2,5} [µg/m ³]	PM ₁₀ [µg/m ³]	CO ₂ [ppm]	TBS [°C]	UR [%]	Ocupantes	Registro de eventos	Vazão sala [m ³ /h]
28	09:01	1,3	1,89	3,45	15,1	510	19,88	69,6%	2	Início atividades	1100
29	09:02	1,21	1,8	3,12	9,8	468	20,2	68,9%	2	Início atividades	1100
30	09:03	1,31	1,88	3,51	17,07	430	20,42	67,6%	3	Início atividades	1100
31	09:04	1,27	1,81	3,29	11,38	440	20,59	67,1%	3	Início atividades	1100
32	09:06	1,21	1,74	3,02	13,03	429	20,01	66,3%	2	Início atividades	1100
33	09:07	1,25	1,78	2,94	11,72	428	20,05	66,1%	2	Início atividades	1100
34	09:08	1,25	1,8	3,1	10,61	423	20,91	65,9%	2	Início atividades	1100
35	09:09	1,21	1,73	3,05	10,07	428	20,96	65,7%	3	Início atividades	1100
40	09:22	1,44	2,05	3,58	12,99	418	19,99	69,0%	4	Varrição	1100
41	09:23	1,38	1,94	3,02	9,55	433	20,26	68,1%	3	Varrição	1100
42	09:24	1,4	1,98	3,24	15,04	430	20,49	67,4%	3	Varrição	1100
43	09:25	1,41	1,98	3,23	10,15	433	20,63	66,8%	3	Varrição	1100
44	09:27	1,42	2,03	3,35	8,47	431	20,74	66,8%	3	Varrição	1100
45	09:28	1,4	1,93	3,06	6,57	426	20,85	66,2%	8	Varrição	1100
46	09:29	1,44	1,98	3,2	8,32	421	20,89	66,1%	9	Varrição	1100
47	09:30	1,48	2,07	3,46	15,6	427	20,96	65,7%	9	Varrição	1100
71	10:07	1,67	2,37	3,76	19,7	459	20,53	67,0%	7	Varrição	1100
72	10:08	1,84	2,61	4,36	16,45	445	20,82	65,9%	7	Varrição	1100
73	10:09	1,94	2,82	4,6	19,42	449	21,06	65,2%	7	Varrição	1100
74	10:10	1,79	2,65	4,54	15,61	449	21,27	64,4%	7	Varrição	1100
79	10:18	2,2	3,7	4,38	14,82	446	20,53	67,2%	6	Varrição	1100
80	10:19	2,21	3,2	4,87	12,47	447	20,86	66,0%	6	Varrição	1100
81	10:20	2,44	3,51	5,14	12,36	447	21,05	65,4%	6	Varrição	1100
82	10:21	2,31	3,36	5,01	13,55	449	21,2	64,8%	6	Varrição	1100
91	10:32	3	3,92	5,75	17,53	435	20,5	67,7%	9	Varrição	1100
92	10:33	2,7	4,12	5,9	18,29	440	20,7	66,8%	9	Varrição	1100
93	10:34	2,86	4,16	6,03	18,37	455	20,99	66,3%	9	Varrição	1100
94	10:35	2,77	3,98	5,67	12,45	479	21,17	65,3%	9	Varrição	1100

Tabela An.E.6: Dados das medições parâmetros, Experimento Varredor Pneumático, 17/10/2020, Ar Interior, Parte B.

Número medição	Horário	PM _{0,5} [µg/m³]	PM ₁ [µg/m³]	PM _{2,5} [µg/m³]	PM ₁₀ [µg/m³]	CO ₂ [ppm]	TBS [°C]	UR [%]	Ocupantes	Registro de eventos	Vazão sala [m³/h]
95	10:37	2,87	4,18	6,06	16,25	465	21,32	65,0%	9	Varrição	1100
96	10:38	2,81	4,03	5,71	17,12	473	21,42	64,4%	9	Varrição	1100
97	10:39	2,79	4	5,72	13,08	471	21,5	64,3%	9	Varrição	1100
98	10:40	2,71	3,96	5,76	14,05	485	21,56	64,0%	9	Varrição	1100
115	11:05	2,88	4,17	5,97	17,77	455	20,14	67,3%	6	Varrição	1100
116	11:06	2,66	3,85	5,57	15,82	472	20,97	66,5%	6	Varrição	1100
117	11:07	2,73	3,92	5,6	17,5	469	21,18	65,7%	6	Pausa na varrição	1100
118	11:08	2,75	3,95	5,39	15,04	480	21,42	64,9%	7	Pausa na varrição	1100
119	11:11	2,93	4,23	5,9	18,78	461	21,67	63,8%	7	Pausa na varrição	1100
120	11:12	2,98	4,3	5,5	18,05	461	21,7	63,5%	7	Pausa na varrição	1100
121	11:13	3,01	4,4	6,34	20,43	473	21,68	63,8%	7	Pausa na varrição	1100
122	11:14	3,12	4,52	6,26	18,5	465	21,63	64,2%	7	Pausa na varrição	1100
134	11:36	3,92	5,45	7,91	19,03	450	20,86	66,7%	3	Varrição	1100
135	11:37	3,62	5,04	7,3	23,14	445	21,24	65,3%	3	Varrição	1100
136	11:38	4	5,52	7,78	23,72	439	21,45	64,7%	3	Varrição	1100
137	11:39	3,93	5,44	7,56	17,61	444	21,63	64,2%	3	Varrição	1100
138	11:41	4	5,54	7,67	20,4	434	21,75	63,7%	3	Varrição	1100
139	11:42	4,02	5,63	7,9	17,26	441	21,76	63,8%	3	Varrição	1100
140	11:43	4,22	5,84	7,75	17,35	438	21	63,6%	3	Varrição	1100
141	11:44	4,11	5,73	7,61	17,16	435	21,8	63,6%	3	Varrição	1100
146	11:53	4,02	5,49	7,37	14,54	458	21,08	66,4%	7	Varrição encerrada	1100
147	11:54	4	5,54	7,44	21,77	460	21,4	65,3%	8	Varrição encerrada	1100
148	11:55	4	5,5	7,64	27,09	449	21,7	64,3%	8	Varrição encerrada	1100
149	11:56	3,95	5,41	7,25	20,46	451	21,83	63,6%	8	Varrição encerrada	1100
150	11:58	5,26	7,27	9,45	12,81	449	22,06	63,1%	8	Varrição encerrada	1100
151	11:59	5,44	7,52	9,83	19,72	450	22,16	62,7%	8	Varrição encerrada	1100
152	12:00	5,09	6,96	8,55	10,16	481	22,22	62,8%	8	Varrição encerrada	1100
153	12:01	5,94	8,01	9,56	10,83	469	22,24	62,6%	8	Varrição encerrada	1100
154	12:05	5,94	7,95	9,84	11,5	460	22,28	62,6%	8	Varrição encerrada	1100
155	12:08	6,23	8,46	10,76	14,07	466	22,46	62,2%	8	Varrição encerrada	1100
156	12:09	6,02	8,11	10,37	12,66	476	22,62	61,9%	8	Varrição encerrada	1100

An.E.4. Concentrações de Fungos Viáveis

Tabela An.E.7: Dados das medições fungos viáveis, Experimento Varredor Pneumático, 17/10/2020, Ar Externo, Parte A (apoio Conforlab).

Número da amostra	Identificação	Data Coleta	Análise	Resultado (UFC/m ³)
84724	AR EXTERNO - 15 minutos APÓS o início do procedimento de varrição (Amostra 2)	17/10/2020	Fungos Viáveis	551
			Cladosporium sp.	452
			Penicillium sp.	7
			Não Esporulado	85
			Phoma sp.	7
84723	AR EXTERNO - 15 minutos APÓS o início do procedimento de varrição (Amostra 1)	17/10/2020	Fungos Viáveis	940
			Não Esporulado	170
			Cladosporium sp.	756
			Penicillium sp.	14
84722	AR EXTERNO - 45 minutos APÓS o início do procedimento de varrição (Amostra 1)	17/10/2020	Fungos Viáveis	2339
			Cladosporium sp.	2304
			Não Esporulado	35
84721	AR EXTERNO - 45 minutos APÓS o início do procedimento de varrição (Amostra 2)	17/10/2020	Fungos Viáveis	1993
			Cladosporium sp.	1915
			Não Esporulado	78
84718	AR EXTERNO - 90 minutos APÓS o início do procedimento de varrição (Amostra 1)	17/10/2020	Fungos Viáveis	2304
			Cladosporium sp.	2276
			Rhizopus sp.	7
			Não Esporulado	21
84717	AR EXTERNO - 90 minutos APÓS o início do procedimento de varrição (Amostra 2)	17/10/2020	Fungos Viáveis	2827
			Cladosporium sp.	2799
			Não Esporulado	21
			Rhizopus sp.	7

Tabela An.E.8: Dados das medições fungos viáveis, Experimento Varredor Pneumático, 17/10/2020, Ar Externo, Parte B (apoio Conforlab).

Número da amostra	Identificação	Data Coleta	Análise	Resultado (UFC/m ³)
84712	AR EXTERNO - 120 minutos APÓS o início do procedimento de varrição (Amostra 1)	17/10/2020	Fungos Viáveis	2297
			Cladosporium sp.	2120
			Penicillium sp.	14
			Não Esporulado	163
84711	AR EXTERNO - 120 minutos APÓS o início do procedimento de varrição (Amostra 2)	17/10/2020	Fungos Viáveis	2085
			Cladosporium sp.	1951
			Não Esporulado	134
84708	AR EXTERNO - 150 minutos APÓS o início do procedimento de varrição (Amostra 1)	17/10/2020	Fungos Viáveis	2035
			Cladosporium sp.	1852
			Não Esporulado	184
84707	AR EXTERNO - 150 minutos APÓS o início do procedimento de varrição (Amostra 2)	17/10/2020	Fungos Viáveis	1611
			Cladosporium sp.	1413
			Não Esporulado	198
84704	AR EXTERNO - 180 minutos APÓS o início do procedimento de varrição (Amostra 2)	17/10/2020	Fungos Viáveis	615
			Cladosporium sp.	516
			Penicillium sp.	7
			Não Esporulado	92
84703	AR EXTERNO - 180 minutos APÓS o início do procedimento de varrição (Amostra 1)	17/10/2020	Fungos Viáveis	1011
			Cladosporium sp.	862
			Penicillium sp.	28
			Não Esporulado	120

Tabela An.E.9: Dados das medições fungos viáveis, Experimento Varredor Pneumático, 17/10/2020, Ar Interior, Parte A (apoio Conforlab).

Número da amostra	Identificação	Data Coleta	Análise	Resultado (UFC/m ³)
84732	SALA A2 _ AMBIENTE DE ESTUDO: 15 minutos APÓS o início do procedimento de varrição (Amostra 1)	17/10/2020	Fungos Viáveis	254
			Cladosporium sp.	191
			Penicillium sp.	21
			Não Esporulado	42
84731	SALA A2 _ AMBIENTE DE ESTUDO: 15 minutos APÓS o início do procedimento de varrição (Amostra 2)	17/10/2020	Fungos Viáveis	382
			Cladosporium sp.	318
			Não Esporulado	57
			Rhizopus sp.	7
84730	SALA A2 _ AMBIENTE DE ESTUDO: 45 minutos APÓS o início do procedimento de varrição (Amostra 1)	17/10/2020	Fungos Viáveis	261
			Cladosporium sp.	205
			Penicillium sp.	21
			Não Esporulado	35
84729	SALA A2 _ AMBIENTE DE ESTUDO: 45 minutos APÓS o início do procedimento de varrição (Amostra 2)	17/10/2020	Fungos Viáveis	254
			Cladosporium sp.	205
			Não Esporulado	42
			Rhizopus sp.	7
84716	SALA A2 _ AMBIENTE DE ESTUDO: 90 minutos APÓS o início do procedimento de varrição (Amostra 1)	17/10/2020	Fungos Viáveis	1654
			Cladosporium sp.	1555
			Não Esporulado	92
			Rhizopus sp.	7
84715	SALA A2 _ AMBIENTE DE ESTUDO: 90 minutos APÓS o início do procedimento de varrição (Amostra 2)	17/10/2020	Fungos Viáveis	1265
			Cladosporium sp.	1208
			Rhizopus sp.	7
			Não Esporulado	49

Tabela An.E.10: Dados das medições fungos viáveis, Experimento Varredor Pneumático, 17/10/2020, Ar Interior, Parte B (apoio Conforlab).

Número da amostra	Identificação	Data Coleta	Análise	Resultado (UFC/m ³)
84714	SALA A2 _ AMBIENTE DE ESTUDO: 120 minutos APÓS o início do procedimento de varrição (Amostra 1)	17/10/2020	Fungos Viáveis	905
			Cladosporium sp.	834
			Penicillium sp.	28
			Não Esporulado	42
84713	SALA A2 _ AMBIENTE DE ESTUDO: 120 minutos APÓS o início do procedimento de varrição (Amostra 2)	17/10/2020	Fungos Viáveis	1032
			Cladosporium sp.	940
			Penicillium sp.	28
			Não Esporulado	64
84710	SALA A2 _ AMBIENTE DE ESTUDO: 150 minutos APÓS o início do procedimento de varrição (Amostra 1)	17/10/2020	Fungos Viáveis	2120
			Cladosporium sp.	1739
			Não Esporulado	375
			Rhizopus sp.	7
84709	SALA A2 _ AMBIENTE DE ESTUDO: 150 minutos APÓS o início do procedimento de varrição (Amostra 2)	17/10/2020	Fungos Viáveis	2148
			Penicillium sp.	120
			Não Esporulado	488
			Cladosporium sp.	1541
84706	SALA A2 _ AMBIENTE DE ESTUDO: 180 minutos APÓS o início do procedimento de varrição (Amostra 1)	17/10/2020	Fungos Viáveis	1399
			Cladosporium sp.	841
			Penicillium sp.	141
			Aspergillus sp.	14
			Não Esporulado	403
84705	SALA A2 _ AMBIENTE DE ESTUDO: 180 minutos APÓS o início do procedimento de varrição (Amostra 2)	17/10/2020	Fungos Viáveis	1569
			Cladosporium sp.	968
			Penicillium sp.	261
			Aspergillus sp.	14
			Não Esporulado	325

Anexo F – Tabelas de Medições Experimento Troca de Filtros

No presente anexo, são apresentados os dados monitorados para cada parâmetros durante o experimento realizado para avaliação da alteração dos filtros de diferentes classes de filtragem sobre a qualidade do ar, realizado no dia 20/11/2021. Estes dados foram utilizados como base para a construção dos gráficos de variação dos parâmetros detalhados no Item 5.3.

Os parâmetros monitorados durante o experimento foram concentrações de CO₂, material particulado (PM_{0,5}, PM₁, PM_{2,5}e PM₁₀) e agentes microbiológicos (fungos viáveis). Foram também realizadas medições das condições termo-higrométricas (temperatura e umidade relativa).

Todas as medições internas ocorreram no ambiente da Sala de Aula A2, localizado no departamento de engenharia mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), cujos dados construtivos podem ser verificados no item 4.3.1.

An.F.1. Concentração de CO₂ e Parâmetros Psicrométricos

Tabela An.F.1: Dados das medições CO₂ e parâmetros psicrométricos, Experimento Troca de Filtros, 20/11/2021, Ar Interior.

Medição	Ocupantes	Horário	TBS (°C)	UR (%)	CO ₂ (PPM)	Observações
Referência Externa	-	12:11	22,7	63,0	359	
1	7	09:15	23,6	64,5	533	Medição de referência - Vac desligado
2	9	09:25	23,5	65,0	551	Segunda medição de referência - Vac desligado
3	9	09:35	24,0	64,2	596	Terceira medição de referência - Vac desligado - Início da medição de fungos
4	10	09:45	24,1	64,7	652	Quarta medição de referência - Vac desligado
Acionamento do A/C - Difusores 1 e 3	7	09:52	-	-	-	Acionamento do sistema de ar condicionado - Aguardando estabilização do sistema
5	8	09:55	23,8	65,7	667	Primeira medição após o acionamento do A/C - Porta fechada
6	9	10:05	22,9	61,5	645	Segunda medição após o acionamento do A/C - Porta fechada - Produto químico
7	7	10:15	22,6	56,6	623	Terceira medição após o acionamento do A/C - Porta fechada
Acionamento do A/C - Todos os difusores	8	10:20	-	-	-	Acionamento da vazão máxima de ar condicionado - Porta aberta
8	8	10:25	22,0	57,6	566	Primeira medição com a vazão máxima - Porta aberta
9	7	10:35	21,9	58,3	507	Segunda medição com a vazão máxima - Porta aberta
Primeira Troca de filtros - G4	7	10:49	-	-	-	Primeira troca de filtros - Filtro G4 no difusor 1
Processo de limpeza	10	11:08	-	-	-	Segundo processo de limpeza com os produtos
Acionamento do A/C - Difusores 1 e 3	10	11:10	-	-	-	Acionamento do sistema em meia vazão
10	10	11:17	21,5	52,4	557	Primeira medição com filtros G4 e meia vazão
11	10	11:23	21,6	51,9	558	Segunda medição com filtros G4 e meia vazão
Acionamento do A/C - Todos os difusores	8	11:40	-	-	-	Acionamento da vazão máxima de ar condicionado - Porta aberta
12	10	11:45	21,5	53,3	528	Primeira medição com filtros G4 e vazão completa
Processo de limpeza	10	11:57	-	-	-	Terceiro processo de limpeza com os produtos
13	10	11:57	21,8	54,9	502	Segunda medição com filtros G4 e vazão completa
Segunda Troca de filtros - 2 M5	7	12:40	-	-	-	Segunda troca de filtros - Filtros M5
Acionamento do A/C - Difusores 1 e 3	10	12:40	-	-	-	Acionamento do sistema em meia vazão
14	10	12:41	21,9	52,6	614	Primeira medição com dois filtros M5 e meia vazão
15	10	12:51	21,6	52,2	559	Segunda medição com dois filtros M5 e meia vazão
Acionamento do A/C - Todos os difusores	10	12:56	-	-	-	Acionamento da vazão máxima de ar condicionado - Porta aberta
16	10	13:02	21,3	52,3	541	Primeira medição com dois filtros M5 e vazão completa
17	10	13:05	21,5	56,1	503	Segunda medição com dois filtros M5 e vazão completa

An.F.2. Vazões de Ar nos Difusores

Tabela An.F.2: Dados das medições de vazão de ar, Experimento Troca de Filtros, 20/11/2021.

Medição	Horário	Difusor 1 (L/s)	Difusor 2 (L/s)	Difusor 3 (L/s)	Difusor 4 (L/s)	Observações
Referência Externa	12:11	-	-	-	-	
1	09:15	-	-	-	-	Medição de referência - Vac desligado
2	09:25	-	-	-	-	Segunda medição de referência - Vac desligado
3	09:35	-	-	-	-	Terceira medição de referência - Vac desligado - Início da medição de fungos
4	09:45	-	-	-	-	Quarta medição de referência - Vac desligado
Acionamento do A/C - Difusores 1 e 3	09:52	-	-	-	-	Acionamento do sistema de ar condicionado - Aguardando estabilização do sistema
5	09:55	150	-	150	-	Primeira medição após o acionamento do A/C - Porta fechada
6	10:05	150	-	147,5	-	Segunda medição após o acionamento do A/C - Porta fechada - Produto químico
7	10:15	146	-	150	-	Terceira medição após o acionamento do A/C - Porta fechada
Acionamento do A/C - Todos os difusores	10:20	-	-	-	-	Acionamento da vazão máxima de ar condicionado - Porta aberta
8	10:25	147,5	160	157,5	180	Primeira medição com a vazão máxima - Porta aberta
9	10:35	150	170	150	185	Segunda medição com a vazão máxima - Porta aberta
Primeira Troca de filtros - G4	10:49	-	-	-	-	Primeira troca de filtros - Filtro G4 no difusor 1
Processo de limpeza	11:08	-	-	-	-	Segundo processo de limpeza com os produtos
Acionamento do A/C - Difusores 1 e 3	11:10	-	-	-	-	Acionamento do sistema em meia vazão
10	11:17	150	-	120	-	Primeira medição com filtros G4 e meia vazão
11	11:23	150	-	120	-	Segunda medição com filtros G4 e meia vazão
Acionamento do A/C - Todos os difusores	11:40	-	-	-	-	Acionamento da vazão máxima de ar condicionado - Porta aberta
12	11:45	145	180	122,5	190	Primeira medição com filtros G4 e vazão completa
Processo de limpeza	11:57	-	-	-	-	Terceiro processo de limpeza com os produtos
13	11:57	150	155	125	192,5	Segunda medição com filtros G4 e vazão completa
Segunda Troca de filtros - 2 M5	12:40	-	-	-	-	Segunda troca de filtros - Filtros M5
Acionamento do A/C - Difusores 1 e 3	12:40	-	-	-	-	Acionamento do sistema em meia vazão
14	12:41	155	-	140	-	Primeira medição com dois filtros M5 e meia vazão
15	12:51	170	-	135	-	Segunda medição com dois filtros M5 e meia vazão
Acionamento do A/C - Todos os difusores	12:56	-	-	-	-	Acionamento da vazão máxima de ar condicionado - Porta aberta
16	13:02	150	155	145	175	Primeira medição com dois filtros M5 e vazão completa
17	13:05	150	157,5	135	170	Segunda medição com dois filtros M5 e vazão completa

An.F.3. Concentrações de Particulados

Tabela An.F.3: Dados das medições de particulados, Experimento Troca de Filtros, 20/11/2021, Ar Interior, Parte A.

Nº Medição	Horário	PM0,5 (µg.m³)	PM1,0 (µg.m³)	PM2,5 (µg.m³)	PM10 (µg.m³)	Local	Condição
148	09:31:48	1,6	3,43	5,63	32,49	Centro da Sala	Ventilação desligada (condição de referência)
149	09:32:48	1,54	3,27	5,37	30,58		
150	09:40:04	1,52	3,17	5,2	30,89	Lado Esquerdo (Próx. Janelas)	Ventilação desligada (condição de referência)
151	09:41:04	1,51	3,12	4,98	33,6		
152	09:46:53	1,47	3	4,94	29,41	Lado Direito (Próx. Porta)	Ventilação desligada (condição de referência)
153	09:47:53	1,49	3,01	4,96	30,12		
156	09:59:47	1,26	2,46	3,86	18,63	Centro da Sala	Ventilação com 2 caixas (filtros G4+M5)
157	10:00:47	1,28	2,43	3,81	15,12		
158	10:10:53	1,23	2,21	3,29	12,84	Centro da Sala	Ventilação com 2 caixas (filtros G4+M5)
159	10:11:53	1,18	2,2	3,32	14,29		
162	10:20:32	1,15	2,02	2,87	10,82	Centro da Sala	Ventilação com 2 caixas (filtros G4+M5)
163	10:21:32	1,12	1,93	2,77	12,66		
164	10:30:33	1,14	1,88	2,74	8,2	Centro da Sala	Ventilação com 4 caixas (filtros G4+M5)
165	10:31:33	1,14	1,86	2,77	9,98		
166	10:35:37	1,21	1,93	2,73	10,14	Centro da Sala	Ventilação com 4 caixas (filtros G4+M5)
167	10:36:37	1,21	1,98	2,82	8,13		
168	10:38:26	1,21	1,94	2,87	9,21	Lado Esquerdo (Próx. Janelas)	Ventilação com 4 caixas (filtros G4+M5)
169	10:39:26	1,23	2	2,93	11,71		
170	10:41:01	1,21	1,92	2,64	6,34	Lado Direito (Próx. Porta)	Ventilação com 4 caixas (filtros G4+M5)
171	10:42:01	1,21	1,91	2,68	8,48		
172	10:44:40	1,23	1,92	2,64	12,83	Centro da Sala	Ventilação com 4 caixas (filtros G4+M5)
173	10:45:40	1,22	1,93	2,57	10,57		
176	10:55:33	1,15	1,86	2,9	16,11	Centro da Sala	Ventilação com 2 caixas Troca de Filtros
177	10:56:33	1,15	1,84	3,01	15,83		

Tabela An.F.4: Dados das medições de particulados, Experimento Troca de Filtros, 20/11/2021, Ar Interior, Parte B.

Nº Medição	Horário	PM0,5 (µg.m ³)	PM1,0 (µg.m ³)	PM2,5 (µg.m ³)	PM10 (µg.m ³)	Local	Condição
178	11:05:33	1,07	1,71	2,91	19,2	Centro da Sala	Ventilação com 2 caixas Troca de Filtros
179	11:06:33	1,05	1,66	2,98	19,66		
182	11:15:34	0,96	1,55	2,85	22,1	Centro da Sala	Ventilação com 2 caixas (filtros G4)
183	11:16:34	0,95	1,55	3	18,95		
184	11:21:10	0,9	1,44	2,76	18,75	Lado Esquerdo (Próx. Janelas)	Ventilação com 2 caixas (filtros G4)
185	11:22:10	0,88	1,44	2,73	19,21		
186	11:24:37	0,88	1,43	2,61	17,58	Lado Direito (Próx. Porta)	Ventilação com 2 caixas (filtros G4)
187	11:25:37	0,87	1,41	2,45	14,16		
190	11:37:49	0,5	0,7	1,11	4,87	Saída do Difusor 03 (direto no difusor)	Ventilação com 2 caixas (filtro G4)
191	11:38:49	0,56	0,81	1,31	6,04		
192	11:45:51	0,65	0,98	1,77	9,91	Centro da Sala	Ventilação com 2 caixas (filtro G4)
193	11:46:51	0,63	0,95	1,86	13,02		
194	11:54:18	0,69	1,04	1,75	9,85	Lado Esquerdo (Próx. Janelas)	Ventilação com 4 caixas (filtro G4)
195	11:55:18	0,71	1,08	1,79	11,73		
196	12:04:40	0,84	1,23	1,97	7,34	Lado Direito (Próx. Porta)	Ventilação com 4 caixas (filtro G4)
197	12:05:40	0,83	1,23	1,99	7,06		
198	12:07:57	0,83	1,23	2	7,85	Centro da Sala	Ventilação com 4 caixas (filtro G4)
199	12:08:57	0,84	1,27	2,15	8,39		
202	12:18:21	0,83	1,29	2,24	12,04	Centro da Sala	Ventilação com 4 caixas (filtros G4)
203	12:19:21	0,83	1,28	2,5	18,59		
204	12:40:49	0,71	1,12	2,41	27,86	Centro da Sala	Ventilação com 2 caixas Troca de Filtros
205	12:41:49	0,71	1,12	2,4	20,34		
206	12:43:46	0,65	0,93	1,63	10,99	Saída do Difusor 03 (direto no difusor)	Ventilação com 2 caixas (filtros M5+M5)
207	12:44:46	0,67	0,94	1,56	8,05		
210	13:04:57	0,59	0,84	1,74	9,68	Centro da Sala	Ventilação com 4 caixas (filtros M5+M5)
211	13:05:57	0,59	0,85	1,66	11,65		

Tabela An.F.5: Dados das medições de particulados, Experimento Troca de Filtros, 20/11/2021, Ar Externo.

Nº Medição	Horário	PM0,5 (µg.m³)	PM1,0 (µg.m³)	PM2,5 (µg.m³)	PM10 (µg.m³)	Local
154	09:52:53	1,03	1,8	2,61	6,71	Ar Externo
155	09:53:53	1,04	1,75	2,38	7,74	
160	10:15:47	1,55	2,72	3,79	10,32	Ar Externo
161	10:16:47	1,21	1,9	2,86	8,76	
174	10:50:11	1,44	2,4	4,14	15,45	Ar Externo
175	10:51:11	1,38	2,28	3,91	14,44	
180	11:10:35	0,61	0,99	1,73	8,36	Ar Externo
181	11:11:35	0,59	0,98	1,82	7,53	
188	11:33:20	0,55	0,79	1,71	10,83	Ar Externo
189	11:34:20	0,53	0,75	1,58	8,16	
200	12:11:43	1,11	1,76	3,09	13,18	Ar Externo
201	12:12:43	1,02	1,59	2,89	13,66	
208	12:48:33	0,83	1,17	2,25	11,32	Ar Externo
209	12:49:33	0,79	1,1	2,06	11,28	
212	13:15:01	0,63	0,87	1,55	5,94	Ar Externo
213	13:16:01	0,62	0,86	1,58	6,07	

An.F.4. Concentrações de Fungos Viáveis

Tabela An.F.6: Dados das medições fungos viáveis, Experimento Troca de Filtros, 20/11/2021, Ar Interior, Lado Esquerdo (apoio Conforlab).

Id Amostra	Número	Identificação	Hora	Análise	Valor	Unidade Medida	Limite de Quantificação	Incerteza
547868	107483	Interno Esquerda - 09:45min	9:45	Fungos Viáveis	548	UFC/m ³	7	50
547869	107482	Interno Esquerda - 10h37min	10:37	Fungos Viáveis	278	UFC/m ³	7	25
547872	107479	Interno Esquerda - 11h21min	11:21	Fungos Viáveis	588	UFC/m ³	7	54
547875	107476	Interior Esquerda - 11h51min	11:51	Fungos Viáveis	437	UFC/m ³	7	40
547878	107473	Interno Esquerda - 12h48min	12:48	Fungos Viáveis	699	UFC/m ³	7	64
547881	107470	Interno Esquerda - 13h09min	13:09	Fungos Viáveis	389	UFC/m ³	7	35

Tabela An.F.7: Dados das medições fungos viáveis, Experimento Troca de Filtros, 20/11/2021, Ar Interior, Lado Direito (apoio Conforlab).

Id Amostra	Número	Identificação	Hora	Análise	Valor	Unidade Medida	Limite de Quantificação	Incerteza
547867	107484	Interno Direita - 09h39min	9:39	Fungos Viáveis	556	UFC/m ³	7	51
547870	107481	Interno Direita - 10h37min	10:38	Fungos Viáveis	326	UFC/m ³	7	30
547873	107478	Interno Direita - 11h21min	11:21	Fungos Viáveis	763	UFC/m ³	7	70
547876	107475	Interno Direita - 11h51min	11:51	Fungos Viáveis	540	UFC/m ³	7	49
547879	107472	Interno Direita - 12h48min	12:48	Fungos Viáveis	667	UFC/m ³	7	61
547882	107469	Interno Direita - 13h09min	13:09	Fungos Viáveis	421	UFC/m ³	7	38

Tabela An.F.8: Dados das medições fungos viáveis, Experimento Troca de Filtros, 20/11/2021, Ar Externo (apoio Conforlab).

Id Amostra	Número	Identificação	Hora	Análise	Valor	Unidade Medida	Limite Quantificação	Incerteza
547866	107485	Ar Externo - 09h50min	9:50	Fungos Viáveis	1478	UFC/m ³	7	135
547871	107480	Ar Externo - 10h43min	10:43	Fungos Viáveis	1367	UFC/m ³	7	125
547874	107477	Ar Externo - 11h21min	11:21	Fungos Viáveis	2399	UFC/m ³	7	219
547877	107474	Ar Externo - 11h51min	11:51	Fungos Viáveis	1271	UFC/m ³	7	116
547880	107471	Ar Externo - 12h48min	12:48	Fungos Viáveis	1581	UFC/m ³	7	144
547883	107468	Ar Externo - 13h09min	13:09	Fungos Viáveis	993	UFC/m ³	7	91