

JULIANA BURIHAN

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR INTERIOR EM ESCOLAS

Orientadora: Professora Doutora Joana Lage

Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias
Faculdade de Engenharia

**Lisboa
2021**

JULIANA BURIHAN

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AR INTERIOR EM ESCOLAS

Dissertação apresentada para a obtenção do Grau do Mestre no Curso de Mestrado em Engenharia do Ambiente, conferido pela Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologia.

Orientadora: Professora Doutora Joana Múrias Lage

Nomeação do júri pelo despacho nº 197/2021 com a seguinte composição:

Presidente: Prof.^a Doutora Cândida Leonor Rocha

Arguente: Prof. Doutor Nuno Henrique Canha Orientador:

Prof.^a Doutora Joana Múrias Lage

Data da defesa 28 Julho

VERSÃO FINAL

Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias
Faculdade de Engenharia

Lisboa

2021

A minha mãe Rose Mary

Agradecimentos

O trabalho exposto nesta dissertação resultou de um longo percurso de empenho, dedicação, descoberta, e, principalmente, de construção, não só profissional, mas também pessoal.

No decorrer de todo o processo que me permitiu alcançar esta etapa final, contei com o inestimável contributo de um grupo de pessoas, ao qual manifesto aqui os meus sinceros agradecimentos.

À minha família e amigos, pelos momentos de apoio e incentivo proporcionados. Em especial, à minha mãe, pelo encorajamento e carinho absoluto.

Por fim, à minha orientadora, Professora Doutora Joana Lage, por toda a orientação e pelos conhecimentos transmitidos ao longo destes meses de trabalho e à oportunidade de realização dos estudos desenvolvidos no âmbito do Projeto ClimACT.

Índice

Agradecimentos	3
RESUMO	10
ABSTRACT	11
Lista de Abreviaturas	12
CAPÍTULO 1 — Introdução	14
1.1. Âmbito do estudo.....	14
1.2. Objetivos e Metodologia	15
1.3. Memória descritiva	16
CAPÍTULO 2 — Revisão da literatura	17
2.1. Alterações Climáticas	17
2.2. Qualidade do Ar	19
2.2.1. QAI em escolas.....	23
2.2.2. Fatores que influenciam a Qualidade do Ar Interior em Escolas.....	26
2.2.2.1 Poluentes do ar interior encontrados no interior das escolas	27
Compostos Orgânicos Voláteis (COV)	27
Formaldeído (CH ₂ O)	27
Monóxido de Carbono (CO)	28
Dióxido de Carbono (CO ₂)	28
Material Particulado (PM).....	28
2.2.2.2. Conforto Térmico	29
2.2.2.3. Ventilação.....	30
2.3. Enquadramento legal	31
2.4. Projetos Europeus relativos a qualidade do ar interior.....	34
CAPÍTULO 3 — Metodologia	37
3.1. Caracterização dos locais de estudo	37
3.2. Campanha de monitorização	41
3.2.1. Poluentes Físico-químicos	42
3.2.1.1. Equipamentos utilizados	42

Parâmetros físicos e T e HR.....	44
3.2.2. Amostragem Passiva.....	45
3.2.2.1 Equipamentos utilizados.....	47
CAPÍTULO 4 — Resultados e Discussão.....	48
4.1. Conforto Térmico	48
4.2. Poluentes Físico-Químico.....	51
4.2.1. Compostos orgânicos voláteis totais	52
4.2.2. Dióxido de Carbono	54
4.2.3. Material Particulado (PM _{2.5})	60
4.2.4. Matéria Particulada (PM ₁₀)	66
4.2.5. Formaldeído.....	71
4.2.6. Amostradores Passivos: COV e Aldeídos	75
4.3. Ventilação.....	78
4.4. Análise comparativa	79
CAPÍTULO 5 — Considerações finais, Limitações e Perspetivas futuras	86
5.1. Considerações finais	87
5.2. Limitações.....	89
5.3. Perspetivas Futuras	90
Referências Bibliográficas	91
ANEXOS	98
Anexo I — Tabela de Frequência dos Equipamentos.....	99

Índice de Figuras

Figura 1 — Exemplos para a contextualização e consequências das alterações climáticas em Portugal	18
Figura 2 — Classificação global de fatores de risco pelo total de mortes por todas as causas em 2019.....	21
Figura 3 — Tendência das concentrações médias anuais de PM ₁₀ em Portugal.....	22
Figura 4 — A tendência das concentrações médias anuais de PM _{2.5} em Portugal	22
Figura 5 — Fatores principais que afetam significativamente a qualidade do ambiente interior.	25
Figura 6 — Comparação de frações de tamanho de PM μm = micrómetro	29
Figura 7 — Localização da área de estudo (escolas 1- 6).....	37
Figura 8 — Localização das salas de aula estudadas (A) escola 1; (B) escola 2; (C) escola 3; (D) escola 4; (E) escola 5; (F) escola 6.....	39
Figura 9 — TSI DustTrak DRX, fotometro GrayWolf sensor e <i>Formaldemeter</i>	44
Figura 10 — Localização do equipamento na sala de aula.	45
Figura 11 — Localização dos suportes dos amostradores passivos numa sala de aula.	46
Figura 12 — Gráfico Valores médios da Temperatura e Humidade Relativa.....	49
Figura 13 — Diagrama de Caixa [COVT] para todas as escolas	53
Figura 14 — Série temporal [COVT] na sala E1:2.....	54
Figura 15 — [CO ₂] e Valor Limite.	55
Figura 16 — [CO ₂] e % Taxa de ocupação.....	56
Figura 17 — Diagrama de Caixas [CO ₂] de todas as salas	57
Figura 18 — Série temporal [CO ₂] E6:2	58
Figura 19 — Série temporal [CO ₂] E3:2	59
Figura 20 — Série temporal [CO ₂] E2:1	60
Figura 21 — Gráfico Série temporal [CO ₂] E2:1	60
Figura 22 — [PM _{2.5}] e Valor Limite.	61
Figura 23 — Gráfico Box-plot para o PM _{2.5}	62
Figura 24 — Série temporal [PM _{2.5}] E3: 2.....	63
Figura 25 — Série temporal [PM _{2.5}] sala E3:1	64
Figura 26 — Série temporal [PM _{2.5}] sala E2:2	65
Figura 27 — Série temporal [PM _{2.5}] sala E4:1	65
Figura 28 — Concentração média de PM ₁₀	66
Figura 29 — Gráfico Box-plot com as concentrações mínimas, 1º quartil, mediana, 2º quartil e máximos de PM ₁₀	68

Figura 30 — Série Temporal do PM_{10} E3:2	69
Figura 31 — Série Temporal do PM_{10} E2:2	70
Figura 32 — Série Temporal PM_{10} E3:1	70
Figura 33 — Série Temporal [PM_{10}] na sala E4:1.....	71
Figura 34 — [CH_2O] média	71
Figura 35 — Série temporal [CH_2O] E3:1 e E3:2.....	73
Figura 36 — Série temporal [CH_2O] E6:2.....	75
Figura 37 — Gráfico comparação resultados [$PM_{2.5}$] da C_1 e C_2	80
Figura 38 — Gráfica comparação resultados [PM_{10}] da C_1 e C_2	81
Figura 39 — Gráfico evolução comparativa [CO_2] das 1º e 2º campanhas	82
Figura 40 — Comparação entre % [CO_2] de C_1 e C_2	83
Figura 41 — Gráfico comparação [COVT] para C_1 e C_2	84

Índice de Tabelas

Tabela 1 — Fatores e fontes que afetam a QAI e o Conforto térmico.....	26
Tabela 2 — Limiar de proteção e margem de tolerância para os poluentes físico-químicos de acordo com a Portaria n.º 353-A/2013, de 4 de dezembro de 2013	32
Tabela 3 — Valores recomendados	33
Tabela 4 — Valores limites para diferentes compostos orgânicos voláteis e aldeídos.....	34
Tabela 5 — Projetos de investigação europeu CE sobre QAI.....	35
Tabela 6 — Nomes, Níveis de Ensino, Localização e Coordenadas Geográficas das Escolas estudadas.	38
Tabela 7 — Principais características das salas monitoradas	39
Tabela 8 — Parâmetros coletados na campanha de monitorização	41
Tabela 9 — Equipamentos de monitorização dos parâmetros de QAI e características.	43
Tabela 10 — Limites de detecção para as substâncias analisadas	46
Tabela 11 — Equipamentos utilizados para medições de 9 aldeídos selecionados e 10 concentrações de COV (amostradores passivos).....	47
Tabela 12 — Resultados da Temperatura média das salas de aulas	48
Tabela 13 — Resultados da Humidade relativa (HR) média das salas de aulas.....	48
Tabela 14 — Resultados para taxa de ocupação (%).....	50
Tabela 18 — Valores médios, mínimos e máximos de [PM _{2.5}].....	62
Tabela 21 — Resultados Amostradores Passivos escolas 1- 3.....	76
Tabela 22 — Resultados Amostradores Passivos escola 4 – 6.	77
Tabela 24 — Percentagem de diferença da análise evolutiva COVT.....	84
Tabela 26 — Tabela de [COV] da C ₁ e C ₂ (Escolas 1-6)	86
Tabela 22 — Tabela de frequência dos equipamentos utilizados	99

RESUMO

O estudo da Qualidade do Ar Interior (QAI) é uma questão fundamental, dado que, atualmente, as pessoas passam cerca de 90% do seu dia em ambientes interiores. Esta questão torna-se ainda mais relevante quando se discute esta problemática nas escolas, espaços aglomeradores de uma faixa mais sensível e suscetível da população, as crianças e os jovens. Esta dissertação pretende analisar a QAI de edifícios escolares localizados nas zonas urbanas de Lisboa e Loures. Para tal, realizou-se a monitorização das concentrações dos poluentes CO, CO₂, COV, PM_{2.5}, PM₁₀ e Aldeídos em 12 salas de aula de 6 escolas. Os resultados deste estudo demonstram que vários poluentes apresentam níveis de concentração acima dos parâmetros permitidos pela Legislação Portuguesa, Europeia e Organização Mundial da Saúde (OMS), nomeadamente o CO₂ com valores muito acima do valor limite, o PM_{2.5} também com excessos em quase todas as escolas e o PM₁₀ com valores superiores em 33% dos estabelecimentos de ensino. Este cenário apresenta-se preocupante, já que os jovens passam muito tempo do seu dia no interior das escolas e a garantia de condições saudáveis é fundamental para a sua aprendizagem e bem-estar. Neste sentido, ações como garantir um correto dimensionamento das salas e ventilação face ao número de ocupantes, e evitar exposição a fontes de poluentes exteriores ou interiores nas escolas são fundamentais.

Palavras-chave: Qualidade do Ar Interior, Estabelecimentos Educacionais, Poluentes Atmosféricos, Ventilação.

ABSTRACT

The study of the Indoor Air Quality (IAQ) is a crucial issue, since nowadays the world population spends 90% of their time in indoor spaces. This problematic becomes ever more relevant when applied to schools, which gather a more sensitive and susceptible group of the population, children and young people.

This study aims to analyze the IAQ of school buildings located in the urban areas of Lisbon and Loures. For this purpose, concentrations of the pollutants CO, CO₂, VOCs, PM_{2.5}, PM₁₀ and Aldehydes were monitored in 12 classrooms from 6 schools. The results show that several pollutants concentrations were above the limits identified by national legislation. Levels were above the parameters allowed by Portuguese and European Legislation and the World Health Organization, namely CO₂, largely exceeding the limit value. The PM_{2.5} was also above the limit value in almost all schools, and the PM₁₀ represented higher values in 33% of the schools. This scenario is concerning since young people spend a large amount of their daily time in school, where safe conditions should be guaranteed to promote their learning process and general well-being. Thus, actions such as a correct dimensioning and ventilation of the classrooms in accordance with the number of occupants, and avoidance of indoor or outdoor pollution sources exposure in schools should be safeguarded.

Keywords: Indoor Air Quality, Schools, Pollutants, Ventilation.

Lista de Abreviaturas

µg	Micrograma
AEA	Agência Europeia do Ambiente
AGNU	Assembleia Geral das Nações Unidas
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
CE	Conselho Europeu
CH₂O	Formaldeído
CO	Monóxido de Carbono
CO₂	Dióxido de Carbono
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
COVT	Compostos Orgânicos Voláteis Totais
GEE	Gases de Efeito de Estufa ou Gases do Efeito Estufa
HR	Humidade Relativa
IEQA	Índice Europeu da Qualidade do Ar
INE	Instituto Nacional de Estatística
IPCC	Painel Intergovernamental da ONU para as Alterações Climáticas
m	Metro
m³	Metro cúbico
min	Minuto
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
OMS	Organização Mundial de Saúde
ONDR	Observatório Nacional das Doenças Respiratórias
ONU	Organização das Nações Unidas
PM	Matéria Particulada
PM₁₀	Fração da matéria particulada total em suspensão de dimensão inferior a 10 µg
PM_{2.5}	Fração da matéria particulada total em suspensão dimensão inferior a 2.5 µg
Ppb	Fração molar em partes por bilião
Ppm	Fracção molar em partes por milhão
QA	Qualidade do Ar
QAI	Qualidade do Ar Interior

s	Segundo
SED	Síndrome de Edifício Doente
UE	União Europeia
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas
US-EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
VL	Valor Limite

CAPÍTULO 1 — Introdução

1.1. Âmbito do estudo

Atualmente, as pessoas passam muito tempo do seu dia, quer seja a trabalhar, quer seja a estudar, em ambientes interiores que são projetados para nos dar conforto térmico, abrigo, segurança e garantir uma boa qualidade de vida. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), passamos mais de 90% do nosso tempo em espaços interiores (Agência Europeia do Ambiente, 2016, 2020b; OMS, 2017). Para além disso, existem fortes evidências de que tanto os produtos de consumo já presentes nos ambientes interiores, como aqueles resultantes das atividades dos ocupantes, juntamente com a ocupação desordenada do espaço, podem trazer consideráveis consequências ambientais, nomeadamente a concentração excessiva de poluentes.

Neste cenário, o estudo da qualidade do ambiente interior reveste-se de particular importância, nomeadamente em ambiente escolar. As escolas congregam em si uma faixa etária da população mais sensível e propensa a desenvolver doenças respiratórias, isto é, as crianças e os jovens. Estes grupos passam uma significativa parte do seu tempo em ambientes interiores, o que os torna suscetíveis à exposição excessiva a uma série de poluentes potencialmente perigosos à saúde.

A presente dissertação propõe contribuir para o estudo das causas e efeitos da poluição atmosférica, mais especificamente no que diz respeito ao Ar Interior em escolas do distrito de Lisboa, de forma a conseguir respostas para melhorar a Qualidade do Ar Interior (QAI).

A razão para a escolha do tema reside na relevância que estes espaços assumem, uma vez que os jovens passam muito do seu tempo na escola, sendo a garantia de condições saudáveis fundamental para a aprendizagem e bem-estar dos ocupantes.

Este trabalho aborda os problemas de poluição do ar interior, que podem ser causados por poluentes encontrados na vida diária dos estudantes e professores, procurando responder à seguinte questão: *Em que medida os teores dos poluentes em estudo, em ambientes académicos, estão em conformidade com os padrões estabelecidos em Portugal?*

1.2. Objetivos e Metodologia

A presente dissertação tem como objetivo a avaliação da Qualidade do Ar Interior (QAI) em espaços interiores pertencentes a edifícios escolares localizados na zona urbana de Lisboa e Loures. Para tal, procedeu-se à identificação dos principais poluentes do ar interior e à quantificação da sua concentração em doze salas de aula em seis escolas.

A metodologia aplicada consistiu na realização de uma campanha de monitorização em cada sala de aula, através da medição em ininterrupto dos poluentes. Posto isto, foi verificada a sua conformidade com as normas e regulamentos que fixam valores limite estabelecidos em Portugal, com vista à proteção da saúde humana.

As análises dos poluentes foram realizadas de acordo com o Guia Técnico da Agência Portuguesa do Ambiente (APA), intitulado “Qualidade do Ar em Ambientes Interiores” (APA, 2009). A este respeito, será de realçar o Projeto Interreg Sudoeste ClimACT, que deu apoio à escrita desta dissertação ao permitir a caracterização do ambiente escolar e a observação das principais diferenças registadas a nível dos parâmetros ambientais. Com o presente estudo de avaliação da QAI pretende-se:

- monitorizar as concentrações dos parâmetros ambientais que afetam a QAI, nomeadamente, matéria particulada (PM_{10} e $PM_{2.5}$), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis totais (COVT), temperatura do ar e humidade relativa (HR), bem como uma amostragem passiva de um grupo de aldeídos e compostos orgânicos específicos;
- avaliar a conformidade legal dos resultados;
- analisar a evolução QAI das escolas que fazem parte do estudo efetuado.

Para além disso, por forma a identificar possíveis influências e estudar as causas, realizaram-se registos sobre comportamentos (aberturas de portas e janelas) e possíveis variações entre observações, tendo-se registado o número de ocupantes nos espaços interiores durante o decorrer da campanha experimental de medições.

1.3. Memória descritiva

A presente dissertação encontra-se estruturada em quatro capítulos. Os dois primeiros capítulos (1 e 2), de índole mais teórica, discutem e exploram grande parte da bibliografia consultada, apresentando os aspetos mais relevantes da temática da QAI nas escolas. Os dois últimos (3 e 4) tratam a apresentação e análise do estudo desenvolvido e a campanha realizada.

No capítulo 1 pretende-se fazer o enquadramento geral do tema, expondo, igualmente, o âmbito e os principais objetivos, juntamente com a metodologia adotada para o alcance do desenvolvimento do estudo.

No capítulo 2 apresentam-se sintetizadas as noções teóricas acerca do tema, abrangendo as temáticas que sustentam o trabalho desenvolvido, nomeadamente a caracterização da QAI e a identificação dos poluentes presentes, e conforto térmico. Neste capítulo, encontram-se ainda mencionados alguns estudos nacionais e internacionais mais relevantes na avaliação da QAI em escolas.

No capítulo 3 é apresentado e a caracterizado o estudo, identificando-se a regulamentação técnica existente e aplicável, bem como a metodologia utilizada.

No capítulo 4 procede-se à exposição dos resultados da campanha de monitorização e amostragem passiva, assim como a consequente análise crítica, com base na legislação e nas recomendações existentes. Neste capítulo é igualmente realizada uma análise comparativa dos resultados deste estudo com os resultados obtidos numa avaliação da QAI realizada anteriormente, no âmbito do projeto ClimACT.

No capítulo 5 apresentam-se as conclusões gerais do trabalho, incluindo as limitações do estudo, bem como sugestões para desenvolvimentos de trabalhos futuros nesta área de investigação.

CAPÍTULO 2 — Revisão da literatura

2.1. Alterações Climáticas

O debate sobre as “Alterações Climáticas” tem ganho destaque na sociedade em geral, tendo alcançado bastantes progressos nas últimas décadas, desde os simples avisos científicos à realidade dura e evidenciada com o aumento da temperatura média do planeta e da ocorrência de diversos fenómenos atípicos, originando uma crescente preocupação em todo o mundo.

Com o objetivo de compreender as mudanças climáticas induzidas pelo homem e a partir disso compilar e divulgar para o mundo a informação mais avançada disponível, a Organização das Nações Unidas (ONU) criou em 1988 o Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC). Desde então, sucessivos relatórios deste painel atribuem a maior parte do aquecimento global observado a atividades antropogénicas (IPCC, 2001).

O aquecimento global é um dos problemas ambientais mais debatidos pela ciência nos últimos anos, sendo um facto “inequívoco” no qual a “influência humana (...) é clara” (Rocha, 2015, p. 233). Não obstante a tomada de políticas destinadas ao seu combate e medidas preventivas, o aumento da poluição atmosférica é, anualmente, a causa de morte de, aproximadamente, 6,5 milhões de indivíduos (OMS, 2016). Com a assinatura da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas (UNFCCC), com cerca de 194 países participantes (entre eles Portugal), vários estados se comprometeram a estabelecer uma união em prol do desenvolvimento inteligente e sustentável, definindo metas a alcançar até 2050 e tendo admitido, nomeadamente, a necessidade de um maior controlo da qualidade do ar (“UNFCCC,” 1992).

O Acordo de Paris, assinado em 2015, representa uma mudança de paradigma na implementação da UNFCCC. Este documento estabeleceu objetivos de longo prazo a serem atingidos, entre os quais um balanço a nível global entre emissões e remoções antropogénicas de gases na segunda metade do século XXI, que possibilitem a manutenção do aumento da temperatura média global a um máximo de 2°C acima dos níveis pré-industriais.

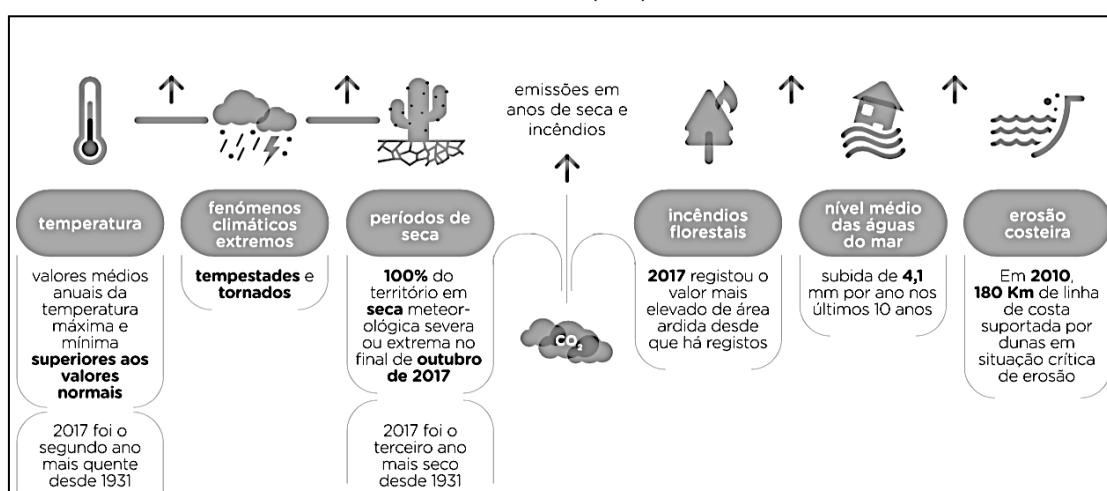
Um exemplo do compromisso por parte da comunidade internacional em garantir que esse aumento não ultrapasse o 1,5 °C, passou pela aprovação, a 25 de setembro de 2015, na Assembleia Geral das Nações Unidas (AGNU), da Agenda 2030 de Desenvolvimento Sustentável. Trata-se de um plano de ações para as pessoas, mundo e prosperidade nos próximos 15 anos para “Transformar o nosso mundo”, estruturado em forma de agenda com 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas que todos os países procurarão implementar até 2030.

O Regulamento (UE) 2018/1999 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 11 de dezembro de 2018, estabelece 5 objetivos em relação ao clima e à energia. Um dos cinco passa por procurar uma redução das emissões de gases de efeito de estufa em 30%, em comparação com os níveis de 2005, até 2030. Desde então, esforços estão a ser mobilizados para combater as alterações climáticas.

Na Figura 1, retirada do Relatório do Estado do Ambiente de 2018 (APA, 2018), é possível entender não só o enquadramento das alterações climáticas no contexto português, mas também as consequências das alterações climáticas, anualmente, em Portugal. Os dados dizem respeito ao ano de 2017, sendo este, um ano de consideráveis variações.

Figura 1 — Exemplos para a contextualização e consequências das alterações climáticas em Portugal

Fonte: APA (2018)



Existe uma tendência para um aumento das concentrações de partículas em suspensão, o que, por sua vez, contribui para a degradação da qualidade do ar, acarretando um aumento do risco de doenças associadas à poluição do ar ("Resolução do Conselho de Ministros n.º 53/2020, que aprova o PNEC 2030," 2020). Segundo dados do Observatório Nacional das Doenças Respiratórias (ONDR), diversos fenómenos, como a onda de calor de julho de 2013 em Portugal provocaram um pico de mortalidade entre finais de dezembro de 2014 e fevereiro de 2015, assim como fenómenos de temperaturas excecionalmente baixas, perfazendo um total de 4625 óbitos em Portugal (ONDR, 2017).

Neste contexto, os locais de maior preocupação são aqueles que envolvem exposição prolongada e contínua, ou seja, a casa, a escola e o local de trabalho. A tentativa de gestão desta problemática a nível mundial tem sido objeto de vários estudos científicos, que serão sintetizados ao longo deste trabalho.

Compreender o ambiente interior na sua totalidade acarreta ter em consideração todas as variáveis, incluindo as condições exteriores existentes e futuras, que potencialmente afetam os parâmetros da QAI, nomeadamente o CO₂, COV, aldeídos, PM_{2,5} e PM₁₀. Portanto, é particularmente relevante colocar esta abordagem no contexto das alterações climáticas,

uma vez que devemos ter em consideração as variações climáticas e os vários parâmetros decisivos da QAI que serão alterados. As principais fontes de contaminação encontram-se entre quatro paredes, mas uma parte provém também do exterior, onde as emissões dos transportes, da indústria e dos trabalhos de construção civil assumem um papel importante.

Ao longo do subcapítulo 2.2.2., serão abordados não só o conjunto de fatores que influenciam a QAI, como também as suas diferentes origens.

2.2. Qualidade do Ar

A OMS (2000) considera que o direito de respirar um ar interior saudável é um direito universal. Dado que, nos países desenvolvidos, as pessoas passam mais de 90% do seu tempo em ambientes fechados e uma vez que estes ambientes interiores apresentam, muitas vezes, concentrações de poluentes superiores às do exterior, torna-se imprescindível conhecer e estudar a qualidade do ar nestes locais. Simultaneamente, torna-se importante identificar quais os fatores que influenciam a QAI, nomeadamente os poluentes que residem em tais espaços.

O estabelecimento da relação de causalidade entre danos à saúde e poluentes ocorreram a partir de episódios agudos de poluição do ar, em centros urbanos da Europa e Estados Unidos. De acordo com Sundell (2004), a preocupação com a Qualidade do Ar (QA) existirá desde o início do século XX, tendo um dos mais graves episódios sido registado em Londres, em dezembro de 1952 — o chamado Nevoeiro de 1952 ou “Smog London”. Neste episódio, a cidade ficou coberta por um intenso nevoeiro amarelo, que se prolongou durante quatro dias, com composição desconhecida, tão denso que impossibilitava as pessoas de conseguirem ver os seus próprios pés. Como consequência nas três semanas a seguir ao fenómeno, terão morrido cerca de 3000 pessoas, sendo que, até fevereiro de 1953, o total de mortes terá atingido as 12.000 pessoas. Para além disso, estima-se que outras 15.0000 pessoas ficaram gravemente doentes por infeções respiratórias (Sundell, 2004). De acordo com um estudo realizado 64 anos mais tarde por Wang et al. (2016), o motivo das infeções estaria relacionado com a presença de níveis altos de Dióxido de Sulfureto e de PM na constituição do nevoeiro, o que estaria na origem das mortes.

Apesar do evento ter despertado a preocupação sobre a QA no mundo, levando a que, quatro anos mais tarde, em 1956, fosse criada a Lei do Ar Limpo, é apenas após a crise petrolífera (com uma subida drástica do preço do petróleo) que o mundo sentiu uma melhoria significativa na consciencialização e promoção de uma em promover uma QA agradável.

De acordo com vários investigadores, a crise de energia de 1973/1974 foi o ponto de viragem da sociedade quanto à necessidade de impor um limite no consumo energético (Sundell, 2017). Esta crise teve também repercussões na construção civil, começando-se a apresentar uma maior preocupação em obter edifícios energeticamente mais eficientes. Neste

cenário, foram criadas construções conhecidas como “edifícios envelopados”, que visam minimizar a perda de energia através de estratégias como a diminuição de espaços por onde fosse possível o arrefecimento dos edifícios (nomeadamente janelas).

Neste seguimento, começaram a surgir queixas de pessoas que ficavam doentes quando estavam dentro de edifícios deste tipo, com os seus sintomas a desaparecerem quando deles saíam, surgindo assim o termo “tight building syndrome”, ou seja, a síndrome do edifício apertado. Em 1986, esta síndrome acabou por ficar conhecida por Síndrome do Edifício Doente (SED), sendo reconhecido como tal pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US-EPA, 1991).

Com a evolução tecnológica foi possível implementar, gradualmente, medidas mais eficientes de energia, de segurança e de higiene, que vieram possibilitar um maior conforto ao ser humano. Segundo Jones and Molina (2017), uma redução na qualidade do ambiente interior poderá causar uma redução significativa na produtividade dos ocupantes.

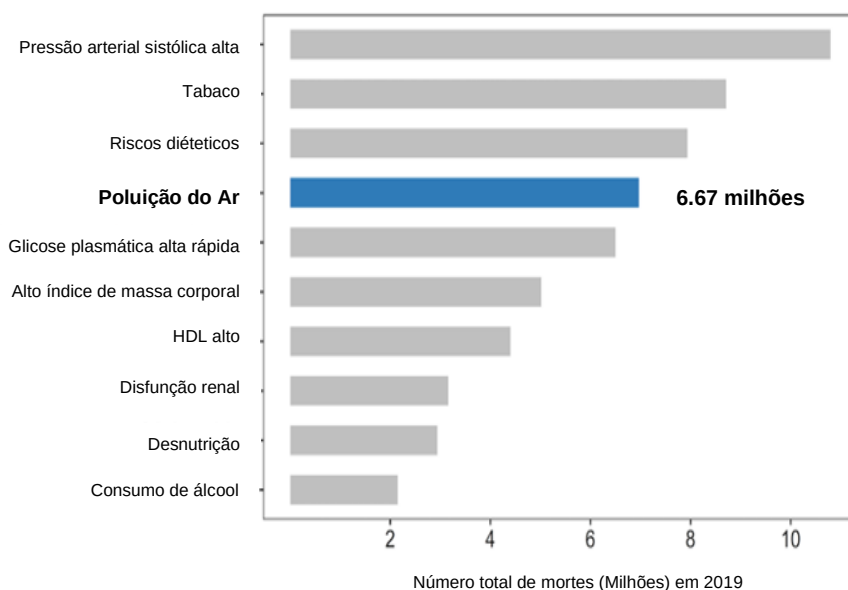
De acordo com a bibliografia, existe uma relação entre a poluição atmosférica e a QAI. Verifica-se que, através da infiltração, ambientes interiores podem ser afetados pelo ambiente exterior. Vários estudos têm demonstrado que o interior dos edifícios pode estar tão ou mais poluído do que o ar das grandes cidades, sendo responsável por grande parte dos poluentes a que estamos expostos.

Dados do relatório de qualidade global do ar do *Health Effects Institute* (2020) corroboram a importância do tema, estimando que, em todo o mundo, em 2019, a poluição atmosférica tenha sido responsável pela morte de cerca de 6,7 milhões de pessoas (ver Figura 2), sendo assim o 4.º principal fator de risco de morte em todo o mundo, superado apenas pela hipertensão, riscos dietéticos e o consumo de tabaco.

Mais especificamente, e de acordo com o Observatório Nacional, em Portugal, as doenças do sistema respiratório são responsáveis por cerca de 19% dos óbitos (INE, 2019a).

Figura 2 — Classificação global de fatores de risco pelo total de mortes por todas as causas em 2019.

Fonte: Health Effects Institute (2020) (Tradução da autora)

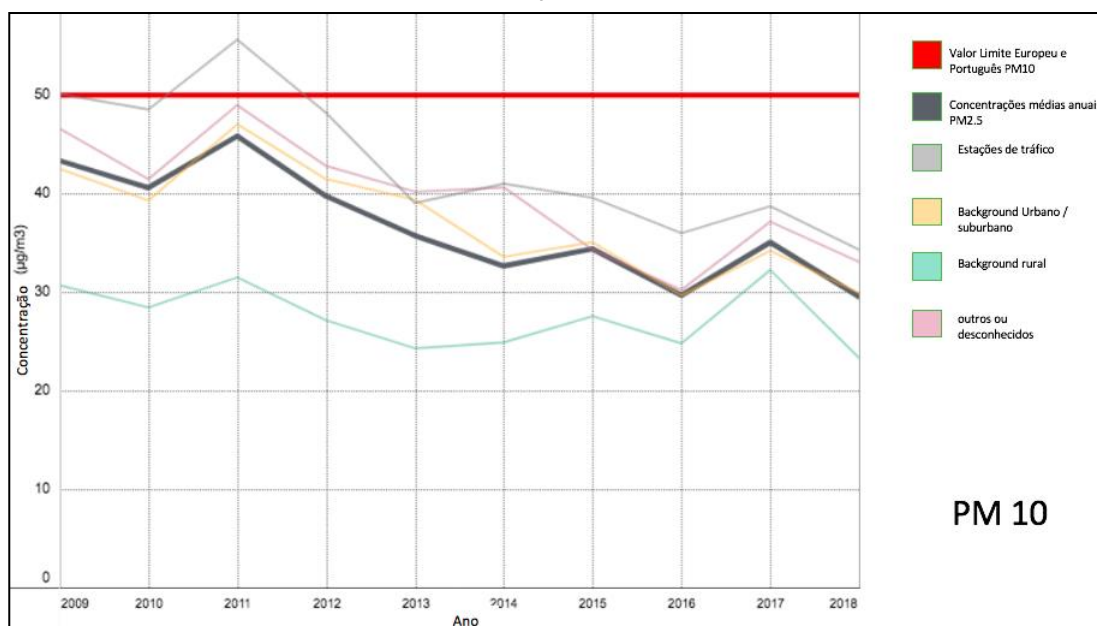


Preocupada em avaliar a qualidade do ar nos países da Europa e os seus potenciais efeitos para a saúde humana, a Agência Europeia do Ambiente (AEA), em conjunto com a Comissão Europeia, desenvolveu uma base de dados interativa¹ através da qual os utilizadores podem verificar a tendência de alguns poluentes específicos, tais como, NO₂, O₃ e PM que afetam a qualidade do ar atual nas cidades e regiões da Europa, em comparação aos valores limites (VL), uma vez que, a legislação europeia estabelece normas de qualidade do ar para curto prazo (horário/diário) e longo prazo (anual).

A partir da observação das Figuras 3 e 4, verifica-se a tendência das concentrações de PM₁₀ em Portugal nos últimos 10 anos, em comparação com o valor limite diário da UE (50 µg/m³), assim como as concentrações médias anuais de PM_{2.5} em comparação com o valor limite anual da UE (25 µg/m³). É possível, assim, constatar que, em ambos os casos, Portugal apresenta níveis abaixo do permitido pela Legislação Europeia. Os dados utilizados para a criação deste gráfico dizem respeito a diferentes tipos de estações, desde zonas rurais a zonas urbanas. Note-se que as curvas dos dados relativos a estações rurais de PM_{2.5} são, na sua grande maioria, inferiores em relação às estações de tráfego e urbano.

¹ Cf. Agência Europeia do Ambiente (2020a)

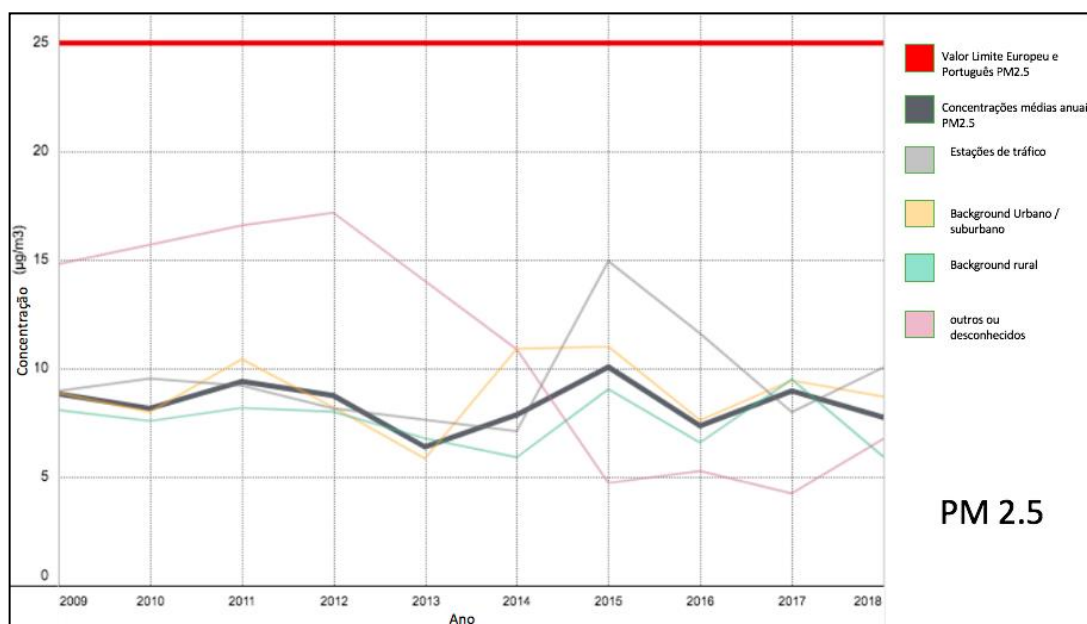
Figura 3 — Tendência das concentrações médias anuais de PM₁₀ em Portugal.



Fonte: Agência Europeia do Ambiente (2020a), consultado a 21 de janeiro de 2021 (Tradução da autora)

Figura 4 — A tendência das concentrações médias anuais de PM_{2.5} em Portugal

Fonte: Agência Europeia do Ambiente (2020a), consultado a 21 de janeiro de 2021 (Tradução da autora)



Embora a QA afete toda a população, estudos da AEA apontam para que certos grupos sejam mais vulneráveis aos seus efeitos na saúde, nomeadamente as crianças, idosos, mulheres grávidas e pessoas com problemas de saúde pré-existentes ou doenças crónicas do foro cardiorrespiratório (AEA, 2020b).

Segundo o relatório “*Air Quality in Europe – 2020 Report*” da AEA, no que diz respeito aos impactos na saúde atribuíveis à exposição de poluição do ar, as concentrações de PM_{2.5}, em 2018, foram responsáveis por cerca de 417.000 mortes prematuras na Europa (AEA,

2020b).

A grande concentração de pessoas em espaços confinados resulta em piores níveis da QAI, derivado do aumento na concentração de poluentes, que pode vir a provocar desconforto, cansaço, fadiga, cefaleias e, ainda, facilitar a transmissão de doenças contagiosas. Por isso, foram realizados nas últimas duas décadas diversos estudos, com ênfase na preocupação da QAI (Almeida et al., 2009; Almeida et al., 2014; Annesi-Maesano et al., 2013; Cornet et al., 2013; Gaihre et al., 2014; Haverinen-Shaughnessy et al., 2011).

2.2.1. QAI em escolas

Os estudantes passam 75% das suas vidas em ambientes fechados, tanto em casa, como nas escolas, podendo muitas vezes estar expostos a uma fraca QAI, colocando em causa a sua saúde e bem-estar (Gaihre et al., 2014).

As escolas fornecem serviços vitais de infraestrutura e detêm um papel de destaque na formação de cidadãos conscientes quanto a questões como a sustentabilidade e a nossa pegada de carbono. Em Portugal, no ano letivo 2018/2019, existiam 8.654 estabelecimentos de educação e ensino, sendo que 22,4% destes estavam localizados na Área Metropolitana de Lisboa (Conselho Nacional de Educação, 2020).

Os alunos portugueses são dos que têm uma média de horas de aulas obrigatórias mais elevada da Europa, sendo que os alunos entre o 1.º e o 6.º ano, passam um total de 1039 horas na escola por ano. A maioria das escolas recorre a sistemas de ventilação natural. Porém, muitas vezes, as janelas e portas são mantidas fechadas nas salas de aulas de modo a manterem-se aquecidas, principalmente durante o período de inverno ou estações mais frias, levando ao aumento de concentrações dos poluentes (Conselho Nacional de Educação, 2020).

Uma escola típica em Portugal contém uma variedade de áreas de uso especial, como refeitórios, salas de aula, balneários, laboratórios de ciências, salas de educação tecnológica, salas sem janelas, salas de arte, áreas de armazenamento de limpeza e áreas de armazenamento de manutenção de solos, nas quais a presença de poluentes poderá causar desconforto e problemas de saúde aos ocupantes (Conselho Nacional de Educação, 2020).

Em Portugal, Torres et al. (2018) analisaram um conjunto de 73 salas de aula em 20 escolas do Porto, sendo que 86% das salas excediam os limites de CO₂, PM₁₀ e PM_{2.5}.

Nesta ótica, uma avaliação da QAI e exterior em cinco escolas de Hong Kong (China), na qual se monitorizou o PM₁₀ e CO₂, em salas de aula com diferentes tipos de ventilação, concluiu que níveis altos de PM₁₀ e CO₂ indicavam uma ventilação inadequada, com médias de concentração de CO₂ acima dos 800 µl/L em todas as escolas (Lee & Chang, 1999; Lee &

Chang, 2000).

Nestes microambientes, segundo Mendell e Heath (2005), uma fraca QAI pode causar desconforto e reduzir a atenção dos estudantes, assim como diminuir a sua produtividade, considerando as escolas como particularmente propensas a ter ambientes empobrecidos. Wyon (2004) concluiu que uma má QAI reduziu a performance e produtividade entre 6% a 9% dos estudantes. Um outro estudo de monitorização de diversos poluentes como PM, CO₂ e COV em escolas de França, realizado por Blondeau et al. (2005), auferiu a beneficiação da renovação do ar no interior das salas de aula nas melhorias das concentrações de CO₂.

Na cidade de Munique (Alemanha), uma avaliação da QAI de escolas permitiu comparar níveis de poluentes no inverno e no verão, tendo identificado a influência do clima na QA, concluindo que, no inverno, as concentrações são muito superiores, diminuindo proporcionalmente ao aumento da humidade relativa do ar (Fromme et al., 2007).

Numa pesquisa realizada por Haverinen-Shaughnessy et al. (2011), os autores relacionaram o desempenho académico de 100 escolas do ensino primeiro nos Estados Unidos, tendo concluído que 87 destas tinham taxas de ventilação abaixo das diretrizes recomendadas. As concentrações interiores máximas de CO₂ medidas em cada escola variaram de 661 a 6000 ppm (média de 1779 ppm), enquanto as concentrações exteriores variaram de 328 a 442 ppm (média de 375 ppm). Por isso, é igualmente importante prestar atenção à poluição interior nos locais onde estão os estudantes, já que o ar presente no interior dos edifícios não é originário apenas do exterior.

No contexto dos poluentes do ar interior, a concentração de CO₂ é reconhecida como o principal indicador da QAI em locais densamente ocupados. A fim de manter este nível dentro dos limites saudáveis ou em parâmetros considerados como adequados à saúde dos ocupantes, é essencial promover uma ventilação suficiente de forma contínua, independentemente do sistema de aquecimento-arrefecimento, de modo a evitar o consumo desnecessário de energia (Gil-Baez et al., 2017).

Śmiałowska et al. (2017) afirmam que, de acordo com dados da literatura, existem três fatores principais que afetam significativamente a qualidade do ambiente interior: (i) atividade humana realizada no interior; (ii) emissão por parte do material de construção utilizado, móveis e tipos de equipamentos interiores; (iii) qualidade do ar exterior (ver Figura 5). Para além dos factores identificados, estudos em QAI também evidenciam a importância da ventilação, da HR e da T na garantia de uma boa QAI (Haverinen-Shaughnessy et al., 2011).

Figura 5 — Fatores principais que afetam significativamente a qualidade do ambiente interior.

Adaptado de Śmiełowska et al. (2017) (Tradução da autora)



Sunyer et al. (2015) realizaram uma análise em 39 escolas de Barcelona (Espanha), constatando que a poluição do ar pode causar problemas respiratórios e tem efeitos neurotóxicos para o desenvolvimento humano, tais como: dores de cabeça, falta de ar, náuseas, vômito e aumento da pressão sanguínea. O estudo observou, ainda, que na sua maioria, muitas escolas estavam localizadas próximas de estradas movimentadas.

Petersen et al. (2016) estudaram as taxas de ventilação nas escolas e obtiveram resultados que sugerem que taxas de ventilação adequadas, identificadas no estudo, detiveram um efeito positivo na concentração de curto prazo e no pensamento lógico das crianças que realizam os trabalhos escolares.

Nos Estados Unidos, um estudo levado a cabo pela US-EPA (2012) demonstrou fortes evidências de que os efeitos de saúde associados ao $PM_{2.5}$ em crianças, particularmente a partir da exposição de curto prazo, comprometem o crescimento da função pulmonar, potenciando o desenvolvimento de asma. Outros estudos também concluíram que as crianças estão em maior risco de efeitos na saúde relacionados ao $PM_{2.5}$ (US-EPA, 2019).

Os processos complexos que determinam a exposição a poluentes de origem exterior e interior, incluem infiltração de poluentes exteriores, formação de poluentes interior, reações químicas no ar e em superfícies interiores, adsorção e desgaseificação das superfícies.

2.2.2. Fatores que influenciam a Qualidade do Ar Interior em Escolas

A QAI não é influenciada somente por fatores externos, mas também por questões como os materiais de construção, o equipamento, o mobiliário do próprio edifício, o modo de ocupação dos espaços e a atividade física realizada pelos seus ocupantes são alguns parâmetros que influenciam de modo latente a deterioração da qualidade do ar (Csobod et al., 2014).

Neste âmbito, abordar-se-ão os poluentes que devem ser objeto de avaliação para a caracterização da QAI em salas de aula, os quais são divididos em duas categorias: poluentes físico-químicos e poluentes microbiológicos (fungos e bactérias).

Neste trabalho serão abordados os poluentes físico-químicos e não os microbiológicos, não sendo esta componente discutida nesta pesquisa.

Abordaremos deste modo os poluentes mais relevantes para a caracterização da QAI, tendo por base os seguintes parâmetros: dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis (COV), compostos orgânicos voláteis totais (COVT), formaldeído (CH_2O) e partículas em suspensão (PM_{10} e $\text{PM}_{2.5}$) (Coentro, 2015; Yang et al., 2015). Estes parâmetros, assim como as suas fontes, encontram-se listados na Tabela 1.

Tabela 1 — Fatores e fontes que afetam a QAI e o Conforto térmico

Fonte: Adaptado de APA (2010)

Parâmetros/Fatores	Fonte
Temperatura e Humidade	Colocação imprópria dos dispositivos de medição (termostatos), controlo de humidade deficiente, incapacidade do edifício em compensar climas extremos, número de equipamentos instalados e a densidade de ocupação, conceção desajustada dos espaços em avaliação.
Dióxido de Carbono	Número de pessoas (bioefluentes humanos), queima de combustíveis fósseis (gás, aquecedores, etc.).
Monóxido de Carbono	Emissões de veículos (garagens, entradas de ar), combustão, fumo do tabaco.
Formaldeído	Madeira prensada, contraplacado não selado, isolamento de espuma de ureia – formaldeído, tecidos, cola, carpetes, mobiliário, papel químico.
Material Particulado	Fumo, entradas de ar, papel, isolamento de tubagens, resíduos de água, carpetes, filtros de ventilação mecânica, limpezas.
Compostos Orgânicos Voláteis (COV)	Fotocopiadoras, carpetes, mobiliário, produtos de limpeza, fumo tintas, adesivos, calafetagem, perfumes, laca, solventes.
Ventilação inadequada (ar novo insuficiente, deficiente circulação)	Medidas de poupança de energia e manutenção, má conceção do projeto do sistema de ventilação mecânica, operação deficiente de funcionamento

2.2.2.1 Poluentes do ar interior encontrados no interior das escolas

Compostos Orgânicos Voláteis (COV)

Os compostos orgânicos voláteis (COV), do qual fazem parte quaisquer compostos orgânicos que contenham até 17 carbonos na sua constituição molecular, encontram-se na fase gasosa, usualmente dissipando-se à temperatura e pressão ambiente, originando assim partículas voláteis nocivas não só para a saúde das pessoas, mas também para o meio ambiente.

Estes compostos podem derivar de fontes tanto interiores quanto exteriores, resultado da poluição provocada pelos automóveis. No entanto, provêm na sua grande, de fontes interiores, como equipamento de escritório (impressoras), produtos de limpeza, produtos de higiene pessoal, materiais de construção e mobiliário (Wyon, 2004).

Agentes de limpeza são desenhados para reduzir a carga de vírus, bactérias, fungos, toxinas e alergênicos. Todavia, esses produtos também podem contribuir para o aumento tanto dos COV quanto de outros poluentes, causando problemas de saúde (Seguel et al., 2017).

Formaldeído (CH_2O)

Apesar de ser um tipo de composto orgânico volátil (COV), o formaldeído é normalmente estudado separadamente devido à sua importância. O facto de ser muito volátil não possibilita que a sua avaliação seja realizada do mesmo modo que os restantes compostos orgânicos voláteis. O seu peso molecular é muito baixo, pelo que mesmo concentrações baixas sejam capazes de causar irritação na garganta, nos olhos e no nariz.

Segundo a Organização Mundial de Saúde (2010), Agência Portuguesa do Ambiente (2015b) e Madureira et al. (2015), as fontes de emissão deste composto poderão ser de carácter intermitente ou permanente. Na base da sua ocorrência encontramos os desinfetantes, carpetes, espumas para isolamento, tintas, colas, vernizes etc., essencialmente produtos à base de CH_2O . A sua concentração depende da ventilação, da temperatura exterior e interior e da humidade.

Em contexto de sala de aula podemos encontrar vários dos equipamentos e substâncias supracitados. Muitas destas salas são feitas de contraplacado e outros materiais que contêm formaldeído, podendo verificar-se concentrações muito altas deste composto, principalmente devido ao seu espaço reduzido. Corroborando esta ideia, US-EPA (1991) e Laumbach (2008) concluíram que a grande maioria de produtos de madeira, fibras e aglomerados prensados nas salas de aula, que por sua vez utilizam resinas contendo formaldeído para união das placas, provocam teores excessivos deste poluente em ambientes

interiores.

Monóxido de Carbono (CO)

O Monóxido de Carbono, associado muitas vezes a mortes por envenenamento, é um gás que se pode infiltrar em ambientes interiores de edifícios circunjacentes de vias de comunicação com abundante tráfego, através de ventilação natural (OMS, 2010).

Este poluente pode ser emitido por fontes naturais, tais como a atividade vulcânica, descargas elétricas e emissão de gás natural. As fontes emissoras antrópicas, por sua vez, equivalem a aproximadamente 60% do monóxido de carbono presente na troposfera. A sua emissão principal resulta de processos de combustão incompleta, tendo ascendência na exaustão dos carros, fábricas, queima de lenha, carvão vegetal e mineral (OMS, 2010).

Dióxido de Carbono (CO₂)

Apesar de não ser estimado como um gás poluente no ambiente exterior, em espaços fechados, o dióxido de carbono (CO₂) é considerado um dos principais poluentes no interior de edifícios, dada a sua tendência de acumulação, atingindo níveis bastante superiores aos valores máximos recomendáveis (Rodrigues, 2013). O CO₂ advém, maioritariamente, dos bioefluentes humanos, isto é, este gás faz parte do metabolismo humano sendo expelido durante a expiração.

Material Particulado (PM)

Segundo Anderson et al. (2012), o PM é “uma fração da poluição do ar composta por partículas extremamente pequenas, podendo conter substâncias, ácidos, produtos químicos orgânicos, metais, argila ou partículas de poeira incluindo o carbono negro” (p. 175).

Acredita-se que o PM seja um dos principais poluentes que contribuem para as doenças humanas, constituindo por isso um dos mais importantes poluentes atmosféricos e um dos grandes poluentes do ar interior.

De acordo com Cavaleiro Rufo et al. (2016), o PM é categorizada, por frações de tamanho, da seguinte forma:

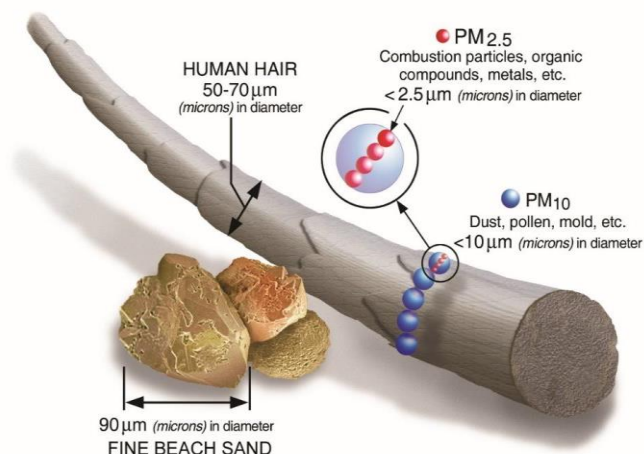
- PM ultrafino (PM₁- material particulado com um diâmetro inferior a 1 µm);
- PM fino ou respirável (PM_{2,5} – material particulado com diâmetro aerodinâmico médio nominal menor ou igual a 2.5 µm);
- PM grosseiro (PM₉ – material particulado com um diâmetro aerodinâmico médio nominal superior a 2.5 µm e menor ou igual a 10 µm).

Estas partículas têm a particularidade de serem transportadas pelo ar e alcançam grandes distâncias relativamente ao local de emissão, podendo igualmente infiltrar-se em

ambientes interiores. Podem ter origem antropogênica: (i) poluição por combustão de motores automotivos; (ii) processos de combustão de indústrias; (iii) fumo de tabaco, entre outras; ou origem natural, tais como: (i) erupções vulcânicas; (ii) poeiras do deserto; (iii) incêndios florestais; (iv) vapores do mar; e (v) pólen. Através da Figura 6, podem-se observar as frações de tamanho de PM, bem como a sua comparação, de acordo com a US-EPA.

Figura 6 — Comparação de frações de tamanho de PM μm = micrómetro

Fonte: US-EPA (s.d.)



2.2.2.2. Conforto Térmico

O conforto térmico pode ser definido como uma condição mental que expressa satisfação com o ambiente térmico circunjacente. Na prática, implica que um determinado indivíduo não sinta frio nem calor excessivo, usando uma quantidade normal de roupa. O conforto térmico é um fator de grande importância para o desenvolvimento e bem-estar dos ocupantes pois a sua ausência pode afetar os níveis de atenção dos trabalhadores e consequentemente o seu desempenho e produtividade. Pode ser influenciado por uma gama de fatores ambientais e individuais, tanto objetivos quanto subjetivos, incluindo temperatura do ar, o movimento do ar, a humidade relativa (HR) e a taxa de troca de ar (a ventilação) (Ormandy & Ezratty, 2012). Mendes et al. (2014) consideram que os ambientes térmicos mal regulados também pioram o impacto dos poluentes na saúde dos ocupantes e, em certos casos, fomentam a presença desses poluentes no ar para ser inspirado.

Dentro das variáveis que mais contribuem para o conforto térmico, podemos referir a temperatura do ar, que é quantificada diretamente a partir da retirada das leituras dos equipamentos de medição. Esta corresponde à temperatura do ar que circunda em volta do corpo humano, sendo o seu valor representado em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

De acordo com a ISO 7730/2005, a humidade do ar é considerada “um parâmetro básico

que influência a taxa de calor perdida por evaporação de uma pessoa” (Organização Internacional de Normalização [ISO], 2005). Para uma HR ser considerada como ótima tem de estar compreendida entre 30% e 60% (Hamehkasi, 2016).

Já uma HR fora dos parâmetros considerados como aceitáveis pode causar desconforto nos ocupantes, tal como secura das mucosas (olhos, garganta e nariz) quando a HR é inferior ao aceitável e problemas respiratórios e reações alérgicas quando a HR é elevada.

2.2.2.3. Ventilação

É de conhecimento geral, e de forma irrefutável, que uma má QAI nas escolas se deve, pelo menos em parte, a uma ventilação inadequada (Gaihre et al., 2014) o que, por sua vez, favorece o aumento da concentração de CO₂ nestes ambientes, muitas vezes, superior a 1000 ppm (Annesi-Maesano et al., 2013; Gaihre et al., 2014; Haverinen-Shaughnessy et al., 2011).

Gaihre et al. (2014) considera que pode existir uma relação entre ventilação inadequada em sala de aula e consequências adversas para a saúde em crianças e jovens, sendo necessários mais estudos sobre esta dinâmica. A concentração de CO₂ é reconhecida como o principal indicador do QAI em locais interiores.

Com o intuito de manter este nível dentro dos limites saudáveis, é necessário fornecer continuamente ventilação suficiente independentemente do sistema de aquecimento-resfriamento para evitar o consumo desnecessário de energia (Gil-Baez et al., 2017).

A ventilação ajuda na diluição das concentrações dos gases bioefluentes e de outros poluentes químicos, físicos ou biológicos que possam ser emitidos em ambientes interiores. A ventilação nas escolas pode ser fornecida mecanicamente por meio de sistema AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado) e/ou naturalmente, por meio de brechas do edifício e como consequência de fluxos de ar naturais através de janelas e portas abertas (Fisk et al., 2019).

Em Portugal, tal como em outros países da região do Sudoeste da Europa, muitas escolas não adotam um sistema de ventilação mecânica, empregando, no entanto, práticas de ventilação diferentes que permitem à mesma a troca de ar quase permanente entre ambientes interiores e exteriores. Este processo é realizado através de simples aberturas de portas e janelas. Os sistemas de ventilação natural são mais sustentáveis, mas envolve o bom senso e uma gestão que varia dependendo dos ocupantes do espaço (Vassella et al., 2021).

Um estudo de QAI conduzido por Rodrigues (2013), com o objetivo de avaliar a dinâmica do CO₂ em salas de aulas sem ventilação mecânica, concluiu que, por vezes, é necessário estar uma janela aberta durante todo o período de aula para garantir que os níveis de CO₂ cumprem com o estabelecido na legislação, mesmo quando se trata de uma ocupação inferior a 50%.

A ventilação mecânica é imprescindível para filtrar o ar exterior onde ele não atende às diretrizes de qualidade do ar existentes. Este processo é caracterizado por obrigar à renovação do ar através de sistemas mecânicos.

Além disso, foi comprovado que a utilização de um sistema mecânico de ventilação em prédios escolares não apresenta os resultados esperados devido à falta de recursos para a sua operação e manutenção, sendo necessário encontrar soluções alternativas para garantir uma QAI satisfatória (Rodrigues, 2013).

Esta tipologia de ventilação é muito aprazível, pois permite a ventilação de espaços fechados, sem a preocupação de ter de abrir ou fechar janelas ou portas.

A norma EN 13779:2007 preparada pelo Comité Técnico do Conselho Europeu (CE), indica que, para a ventilação de espaços não residenciais, uma “taxa de ventilação mínima de 8L/s por ocupante” é necessária “para uma boa qualidade do ar interior e 12.5 L/s por ocupante para qualidade média do ar interior” (Fisk et al., 2019).

2.3. Enquadramento legal

Sendo Portugal um Estado-membro da UE, a legislação de QAI rege-se através de normas instituídas pela Conselho Europeu (CE). Neste contexto, a legislação portuguesa em vigor para a QAI, compreende os seguintes documentos: Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de agosto de 2013; a Portaria n.º 353-A/2013, de 4 de dezembro de 2013; e a Diretiva 2010/31/UE, de 19 de maio de 2010. Esta legislação estabelece a metodologia e avaliação da QAI em edifícios de comércio e serviços, através da definição de valores mínimos de caudal de ar novo por espaço, bem como o limiar de proteção e margem de tolerância para os poluentes físico-químicos. Esta informação encontra-se sintetizada na Tabela 2.

Foi publicado em fevereiro de 2015 pela APA (2015a) o documento intitulado “metodologia para avaliação da qualidade do ar interior em edifícios não residenciais”. Este documento equivale, na sua maior parte, à transcrição de partes da Nota Técnica NT-SCE-02, anteriormente usada no âmbito do RSECE 2016.

Tabela 2 — Limiar de proteção e margem de tolerância para os poluentes físico-químicos de acordo com a Portaria n.º 353-A/2013, de 4 de dezembro de 2013

Poluentes	Unidade	Limiar de proteção	Margem de tolerância (MT) [%]
<i>Material Particulado (PM_{10})</i>	$[\mu g/m^3]$	50	100
<i>Material Particulado ($PM_{2.5}$)</i>	$[\mu g/m^3]$	25	100
<i>Compostos Orgânicos Totais (COVs T)</i>	$[\mu g/m^3]$	600	100
<i>Monóxido de Carbono (CO)</i>	$[mg/m^3]$	10	-
	$[ppmv]$	9	
<i>Formaldeído (CH_2O)</i>	$[ppmv]$	100	
	$[\mu g/m^3]$	0,08	
<i>Dióxido de Carbono (CO_2)</i>	$[mg/m^3]$	2250	30
	$[ppmv]$	1250	

Em 2010, a OMS (2010) publicou os primeiros valores guia para a QAI para poluentes de origem em fontes interiores e com relações conhecidas a problemas de saúde, que podem atingir concentrações inquietantes no interior de edifícios.

De modo a analisar os níveis dos valores recomendados para todos os parâmetros analisados neste trabalho, foi efetuado um levantamento a nível internacional, encontrando-se resumido na Tabela 3.

Tabela 3 — Valores recomendados

Parâmetros	Valores recomendados	Referência
H_R	30 – 60 (%)	ISO 7730/2005 , Norma EN 15242:2007; US-EPA (2010)
T	23 – 26 °C Verão e 20 – 24 °C Inverno	ISO 7730/2005
CO	10 mg/m ³ (média de 8 horas)	OMS (2010)
	30 mg/m ³ (média de 1 hora)	
	7 mg/m ³ (média de 24 horas)	
CO₂	800 a 1000 ppm	EN 13779, 2008
CH₂O	0,1 mg/m ³ (média de 30 minutos)	OMS (2010)
Benzeno	Nenhum nível seguro de exposição pode ser recomendada	OMS (2010)
Material Particulado (fração PM₁₀)	20 µg/m ³ (média anual)	OMS (2006)
	50 µg/m ³ (média de 24 horas) ^a	Diretiva 2008/50/CE, OMS (2006)
	40 µg/m ³ (média anual) *	*Diretiva 2008/50/CE
	150 µg/m ³ (média de 24 horas)	US-EPA (2010)
Material Particulado (fração PM_{2.5})	10 µg/m ³ (média anual)	OMS (2006)
	25 µg/m ³ (média de 24 horas) ^a	

^a Não deve ser excedido mais do que 3 vezes ao ano

Como demonstram as Tabelas 3 e 4, relativamente aos Compostos Orgânicos Voláteis e Aldeídos, é possível observar diferentes limites, de acordo com diversas diretrizes, tanto a nível do contexto português, como de outros diversos países.

Tabela 4 — Valores limites para diferentes compostos orgânicos voláteis e aldeídos.

Fonte: Adaptado de ClimACT (2017)

Poluente	Valores Recomendados	Fonte
Acetaldeído	200 µg/m ³	Exposição de longo prazo da UE (AEA, s.d.)
Acroleína	0.8 µg/m ³	Diretriz francesa para uma exposição de longo prazo. Diretriz da Califórnia é de 0,35 µg / m ³
Benzeno	5 µg/m ³	A diretriz de gestão portuguesa
	2 µg/m ³	Diretriz francesa com base na saúde de 2 µg / m ³
Tolueno	250 µg/m ³	Diretriz portuguesa
	15 µg/m ³	Projeto Index
Xilenos (m+o+p)	20 mg/m ³	Diretriz da UE (projeto Index) para uma exposição a curta prazo (interior)
	200 µg/m ³	Para longa exposição (exterior)
Tricloroetileno	25 µg/m ³	Diretriz Portuguesa
	20 µg/m ³	Diretriz francesa com base na saúde
Tetracloroetileno	250 µg/m ³	Diretriz Portuguesa, Diretriz Francesa e OMS para uma exposição de longo prazo
Estireno	260 µg/m ³	Diretriz Portuguesa
	2 mg/m ³	Diretriz da UE baseada na saúde (Projeto Index) a curto prazo
1,4diclorobenzeno	150 µg/m ³	
α-pineno	200 µg/m ³	Diretriz alemã para uma exposição de longo prazo. Não existe nenhuma diretriz de país europeu

2.4. Projetos Europeus relativos a qualidade do ar interior

Ao longo das últimas duas décadas, a Europa tem vindo a ampliar o seu empenho em estudos sobre a QAI, facto este que se reflete no aumento de publicações e no incremento do investimento da CE em projetos relacionados. Nesta área e observando a Tabela 5 podemos encontrar vários projetos e objetivos, alguns já alcançados, e outros que, atualmente, ainda se encontram a decorrer.

Tabela 5 — Projetos de investigação europeu CE sobre QAI

Fonte: Adaptado de Ramos (2013)

Objetivo	Acrônimo	Título
Identificar uma lista de "compostos prioritários" com base em critérios de impacto sobre a saúde. Investigar a associação entre poluentes do ar interior e doenças respiratórias. Relacionar a alta presença de partículas, fungos e alérgenos com a fraca ventilação em escolas. Criar uma base de dados sobre as emissões dos materiais de construção, priorizar os materiais a utilizar de acordo com os fatores de emissão e desenvolver orientações para a criação de novas políticas. Identificar e quantificar os principais poluentes do ar em edifícios públicos, incluindo escolas e jardins de infância e estimar a exposição da população e possíveis efeitos na saúde, devido a exposição crônica. Aumentar a compreensão dos impactos da qualidade do ar interior na saúde pública, em toda a Europa. Realizar uma revisão dos dados relativos à exposição a poluentes do ar interior. Definir recomendações políticas sobre medidas corretivas no ambiente escolar. Identificar o papel de agentes biológicos interiores no desenvolvimento de doenças respiratórias a longo prazo, reações inflamatórias e alérgicas em crianças. Projeto para análise do progresso e fornecimento de ferramentas para as escolas em direção a uma economia de baixo carbono, analisando os impulsionadores das tendências de emissões e rastreando como as políticas são implementadas. Projeto sobre a redução dos efeitos na saúde da exposição combinada a poluentes atmosféricos interiores em ambientes interiores: escritórios	INDEX (2002-2004) (CE, 2005)	"Critical appraisal of setting and implementation of indoor exposure limits in EU"
	THADE (2001-2003) (EFA, 2001)	"Towards Health Air in Dwellings in Europe"
	HESE (2002-2005) (CE, 2006)	"Health Effects of Schools Environment"
	BUMA (2006-2009)	"Prioritization of BUILDing MATERIALS
	(UOWM, 2006)	as indoors pollution sources"
	AIRMEX (2003-) (CE, 2013)	"European Indoor Air Monitoring and Exposure Assessment Project"
	EnVIE (2004-2007) (IDMEC, 2009)	"Co-ordinationaction on Indoor Air Quality and Health Effects"
	IAQ ranking/VITO (2004-2008)	"Ranking indoor air health problems"
	Sinphonie (2010-2012) (REC, 2010)	Schools Indoor Pollution and Health: Observatory Network in Europe"
	HITEA (2008-) (National Institute for Health and Welfare, 2008)	"Health Effects of Indoor Pollutants"
	CLIMACT (2017-2019)	"Climact - Acting For The Transition To A Low Carbon Economy In Schools – Development Of Support Tools"
	INTERREG	
	OFFICAIR 2017	"Quality indoor air on modern office buildings"

Os projetos realizados em escolas, com o objetivo de apurar as relações entre a QAI e a saúde, são um dos locais de estudo de eleição para as investigações, por serem locais onde os indivíduos estão expostos a poluentes, tratando-se até, muitas vezes, de populações mais suscetíveis a esse risco, como são o caso das crianças. Por outro lado, é através destes projetos que resultam a definição das instruções para a criação de novas políticas.

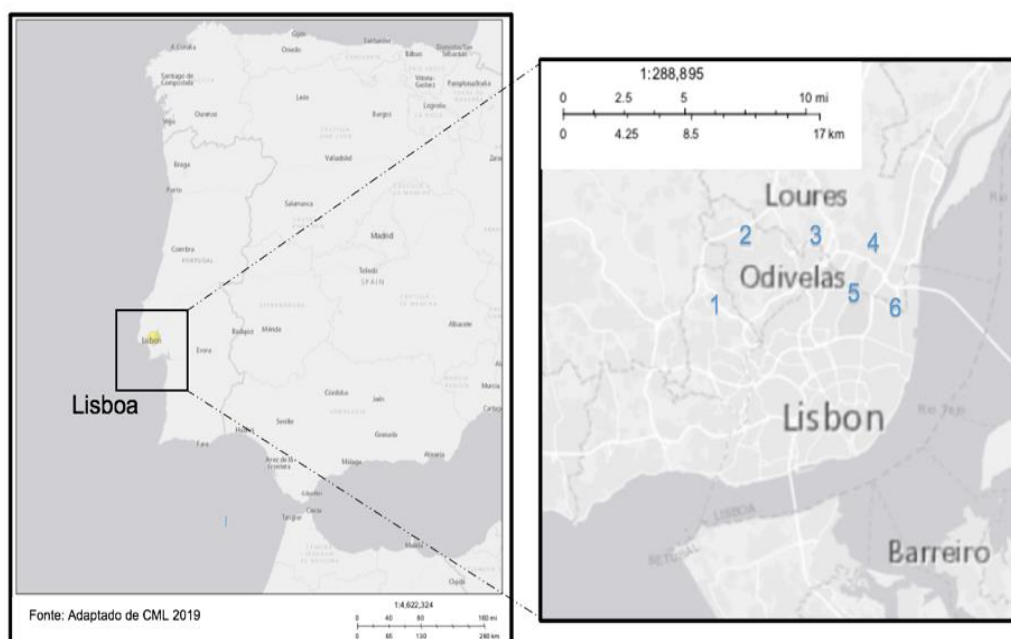
Em Portugal, também têm sido desenvolvidos estudos que abordam a QAI, nomeadamente projetos como: FUTURAR (2019) – QA em Portugal, da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT). O objetivo do projeto passava por investigar os impactos, custos e benefícios da qualidade do ar das projeções de redução de emissões para 2030 em Portugal. Outro exemplo é o projeto SAUDAR (2004) – “Qualidade do ar ambiente e saúde pública”, da Universidade de Aveiro e financiada pela Fundação Calouste Gulbenkian, que estudou cerca de 60 crianças asmáticas do 1º ciclo do ensino básico das escolas do concelho de Viseu (Portugal), com o objetivo de analisar a relação entre a qualidade do ar (exterior e interior) e a saúde humana.

CAPÍTULO 3 — Metodologia

3.1. Caracterização dos locais de estudo

O estudo sobre a avaliação da qualidade do ar interior decorreu em Portugal, em escolas situadas na região Oeste da Península Ibérica. Fazem parte do distrito de Lisboa, nos concelhos de Lisboa e Loures, ambos localizados no centro-sul do país (ver Figura 7), os quais estão inseridos na Área Metropolitana de Lisboa.

Figura 7 — Localização da área de estudo (escolas 1- 6)



A Área Metropolitana de Lisboa é a maior área urbana do país e a décima maior da União Europeia, localizando-se entre as coordenadas 38° 42' 26" de Latitude Norte e -9° 8' 8" de Longitude Oeste, albergando um contingente populacional de aproximadamente 2,8 milhões de habitantes (INE, 2020) distribuídos por 18 municípios — Alcochete, Almada, Barreiro, Amadora, Cascais, Lisboa, Loures, Mafra, Moita, Montijo, Odivelas, Oeiras, Palmela, Seixal, Sintra, Sesimbra, Setúbal e Vila Franca de Xira —, e representando aproximadamente 32% da população do país.

Esta área possui uma extensão de 3015 km², localizada na costa do Oceano Atlântico, no ponto onde o rio Tejo desagua no Atlântico. Por essas razões, são caracterizadas por serem áreas planas e de baixa altitude (inferior a 100 metros), correspondentes às planícies sedimentares das bacias do Tejo e do Sado.

Em relação ao clima e segundo a classificação climática de Köppen, está-se perante um clima mediterrânico tipo Csa (Clima mediterrânico de verão quente) (INE, 2019b; 2020). Foram selecionadas um total de 6 escolas para este estudo, as quais se encontram listadas na Tabela 6: 4 são escolas básicas, 1 é secundária e 1 de ensino superior.

Tabela 6 — Nomes, Níveis de Ensino, Localização e Coordenadas Geográficas das Escolas estudadas.

Escola	Nível de Ensino	Localização	Coordenadas	
1	Ensino Básico	Loures	38.813	-9.169
2	Ensino Básico	Loures	38.816	-9.159
3	Ensino Básico	Loures	38.805	-9.130
4	Ensino Básico	Loures	38.792	-9.123
5	Ensino Secundário	Loures	38.815	-9.164
6	Ensino Superior	Lisboa	38.778	-9.098

De modo a investigar a QAI em escolas, durante o ano letivo de 2017/2018 foi conduzido o projeto ClimACT. Este projeto engloba 39 escolas, onde foram objeto de estudo diversos setores, entre eles a QAI em 4 países da União Europeia. Para a caracterização da QAI foram abordados diversos parâmetros, entre estes, incluem-se os compostos orgânicos voláteis totais (COVT), as partículas em suspensão ($PM_{2.5}$ e PM_{10}), o monóxido de carbono (CO), o dióxido de carbono (CO_2), o formaldeído (CH_2O), bem como a temperatura, a humidade relativa e um conjunto de 9 aldeídos e 10 compostos orgânicos voláteis (COV). Os resultados desta primeira campanha foram descritos por d'Espiney (2017).

Por fim, no ano letivo de 2018/2019 foi realizada uma campanha de monitorização de acompanhamento, de modo a analisar a evolução no âmbito de análise da QAI, em 6 destas 12 escolas localizadas em Portugal. Doravante, a primeira campanha será abreviada como C_1 , e os resultados da segunda campanha são designados de C_2 .

Para ambas as campanhas, procedeu-se à recolha de várias informações relevantes, nomeadamente relacionadas com as características técnicas e físicas das salas: a sua dimensão; os números de portas e janelas; o tipo ou número de pisos, o tipo de construção civil, a idade; o número de ocupantes; os materiais de acabamento; os sistemas de aquecimento e de ventilação; as ocorrências passadas, os problemas visíveis atuais, e as potenciais fontes internas.

Adicionalmente, os professores foram convidados a preencher um registo, no qual foi possível coletar as seguintes informações sobre o funcionamento das aulas, a saber: o número de ocupantes, o tipo de atividade exercida e a abertura ou não de portas/janelas.

Na imagem a seguir (ver Figura 8), podemos observar a localização de cada uma das 6 escolas e das respectivas salas de aula estudadas. Na Tabela 7 são apresentadas as características técnicas das salas monitorizadas.

Figura 8 — Localização das salas de aula estudadas (A) escola 1; (B) escola 2; (C) escola 3; (D) escola 4; (E) escola 5; (F) escola 6



Tabela 7 — Principais características das salas monitoradas

Escola	Sala	Volume [m³]	Área [m²]	Capacidade [ocupantes]	Tipo de chão	Nº Aberturas / Tipo
E1	E: 01	148	46	58	Linóleo	4 JG e 8 JB +1 porta interior - VN
	E: 02	115	36	58	Linóleo	3 J + 6 JB + 1 porta interior - VN
E2	E2: 01	129	47	26	Linóleo	2 JG + 1 porta interior - VN
	E2: 02	129	47	26	Linóleo	2 JG+ 1 porta interior - VN
E3	E3: 01	185	59	24	Linóleo	10 JB 5 portas de correr +1 porta interior - VN
	E3: 02	143	46	28	Linóleo	8 JB 4 de correr + 1 porta interior - VN
E4	E4: 01	200	60	26	Ladrilho	8 J; 8 JB; 2 portas internas 1 porta interior - VN
	E4: 02	150	52	26	Linóleo	4 J e 8 JB +1 porta interior - VN
E5	E5: 01	160	50	24	Linóleo	8 JB+ 4 portas de correr +1 porta interior + 2 JB interior - VN
	E5: 02	192	60	30	Cerâmica	10 JB; 5 portas de correr 1 porta interior 1 JB interior - VN
E6	E: 01	152	59	28	Linóleo	2 JG - VM
	E: 02	152	59	26	Linóleo	2 JG - VM

Legenda J-Janela; JG- janelas grandes; JB- Janela Basculante; VN - ventilação natural; VM - ventilação mecânica

Para além das características estruturais dos espaços, alguns atributos também podem interferir na QAI da sala de aula, entre os quais podemos mencionar: a variação do número de ocupantes, as atividades desenvolvidas pelos ocupantes, a abertura e fecho de portas e janelas e os processos de limpeza. Como nota importante para análise futura neste trabalho, a escola 6 é a única escola com sistema de ventilação mecânico.

3.2. Campanha de monitorização

De modo a replicar as condições da primeira auditoria (C_1), a campanha de monitorização C_2 foi desenvolvida com base na metodologia do projeto ClimACT.

Com o intuito de ter uma melhor caracterização das escolas portuguesas, atendendo aos parâmetros que influenciam a QAI, foi efetuado uma análise comparativa dos dados da C_2 com os da C_1 , e com outros estudos identificados, bem como a verificação da sua conformidade de acordo com as diretrizes atuais.

Além disso, observou-se ainda o comportamento dos ocupantes de modo a avaliar a variabilidade nos níveis de poluentes dentro e entre as escolas, através de registos de atividade diária. Os dados obtidos através destes registos dos professores foram utilizados para ajudar na análise mais acurada dos resultados, bem como para auxiliar na recomendação de eventuais medidas de caráter preventivo e corretivo. O período de monitorização (C_2) ocorreu durante a Primavera de 2019, entre os meses de março a maio, realizada nas salas de aula das 6 escolas.

Os parâmetros avaliados na monitorização estão sintetizados na Tabela 8. Estes incluem também as medições de temperatura e humidade relativa, realizadas a título complementar, visto serem considerados pela APA (2015a) uma mais-valia na interpretação de resultados. Estas medições, em particular, são pertinentes no que diz respeito à avaliação do conforto térmico, podendo contribuir para a deteção de eventuais situações anómalas de incumprimento. Em regra geral, são estes os principais poluentes encontrados no interior das escolas, e, portanto, estes mesmos que serão objeto de análise nesta investigação.

Tabela 8 — Parâmetros coletados na campanha de monitorização

Qualidade Do Ar Interior	Temperatura (T) e Humidade Relativa (H _R)
	Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO ₂), Composto Orgânico Voláteis Total (COVT), Material Particulado (PM ₁₀ , PM _{2.5})
	9 tipos de Aldeídos: formaldeído, acetaldeído, acroleína, propanal, butanal, pentanal, isopentanal, hexanal, benzaldeído
	10 seleção de COV's : Benzeno, tolueno, estireno, tetracloroetileno, tricloroetileno, m-xileno, o-xileno, p-xileno, 1-4 diclorobenzeno, α -pineno
	Formaldeído

A campanha de monitorização dos parâmetros acima inquiriu ao uso de equipamentos específicos de leitura direta, os quais serão apresentados mais à frente neste capítulo, e a uma amostragem passiva COV e aldeídos através de uma amostragem passiva através de difusores. Idêntico a C_1 , a monitorização de COVT, PM_{2.5} e PM₁₀, CO, CO₂, CH₂O, bem como a temperatura, e a humidade relativa foi realizada, de acordo com o mesmo procedimento.

Todos os aparelhos foram configurados para monitorizar continuamente durante pelo

menos 2 dias letivos, ou seja, no mínimo, por uma duração de 48 horas.

Os professores registavam informações relevantes, tais como: os horários de ocupação, as mudanças relevantes de comportamento dos alunos, a abertura de janelas ou portas. Os instrumentos eram colocados o mais afastado do quadro das salas, para evitar perturbações. Um conjunto de compostos orgânicos voláteis específicos e alguns aldeídos foram coletados na amostragem passiva através de difusores passivos.

3.2.1. Poluentes Físico-químicos

Inserido no âmbito das normas nacionais e internacionais relativas à qualidade do ar interior, a monitorização de poluentes CO, CO₂, COVT, PM_{2.5} e PM₁₀ foi efetuada através de métodos automáticos em contínuo (medições contínuas).

As concentrações de CO, CO₂, COVT, PM_{2.5} e PM₁₀ foram monitorizadas entre 2-3 dias consecutivos da semana, de segunda a sexta-feira, definido com base no Manual da Avaliação da qualidade do ar da APA (APA, 2015a), baseado na Portaria 353-A/2013, de 4 de dezembro de 2013. Apenas os valores durante o período ocupado foram considerados para efeitos de resultados.

3.2.1.1. Equipamentos utilizados

Os equipamentos foram colocados no interior de 2 salas de aula, de cada escola. Os aparelhos foram definidos para efetuarem leituras com intervalo em média de 1 segundo a 5 minutos. Este intervalo de tempo foi definido de acordo com a capacidade de memória destes, assim como a duração do período de medição desejado.

O tempo de intervalo das leituras foi um parâmetro determinado com especial atenção, uma vez que intervalos curtos permitirão o rastreio de eventos de curta duração, tais como: as aberturas de janelas, o trânsito de pessoas que entram ou saem da sala ou, até mesmo, no que diz respeito a emissões de poluentes interiores de curta duração na sala de aula.

Os níveis de CO₂, CO e COVT foram registados simultaneamente com os outros parâmetros do ar através do equipamento GrayWolf, uma técnica de deteção não dispersiva de infravermelhos. No interior das salas de aula, os equipamentos foram colocados ao nível da zona de respiração dos estudantes, de forma segura (aproximadamente 1,5 m de distância do chão).

O aparelho recolheu também dados sobre a temperatura e a humidade relativa, com recurso a um sistema de medição DirectSense® IQ-610 conectado a um PDA.

Os teores de formaldeído foram medidos com o equipamento *Formaldemeter*, HTV-M Kit da marca PPM Technology. A Tabela 9 expõe as principais características dos

equipamentos utilizados, para monitorizar as concentrações dos poluentes em salas de aula.

Tabela 9 — Equipamentos de monitorização dos parâmetros de QAI e características.

Descrição do equipamento		Características
GrayWolf sensor		Método de deteção não dispersiva de infravermelhos leitura COVT = ppb concentração em equivalente de etilbenzeno Sistema de medição DirectSense® IQ-610 conectado a um PDA;
TSI DustTrak DRX (modelo 8533; TSI) Concentração de Partículas (PM _{2.5} /PM ₁₀)		Avaliação da concentração de partículas em suspensão no ar; Fotómetro laser (dispersão de luz)
Formaldemeter™ Technology Hd		Avaliação de formaldeído através de sensor eletroquímico por cromatografia

(Adaptado de ClimACT (2017))

Parâmetros físicos e T e HR

De modo a avaliar as concentrações de $PM_{2.5}$ e PM_{10} foi utilizado um fotômetro portátil TSI DustTrak DRX (modelo 8533; TSI). Este equipamento mede partículas com laser, baseado no princípio de espalhamento de luz e opera com caudal de 3,0 L / min, por meio de uma bomba de diafragma embutida e alimentada através de uma bateria interna.

A amplitude de medição é 0.001-150 mg/m^3 e com precisão de $\pm 0.1\%$ na leitura de 0.001 mg/m^3 .

Os instrumentos foram instalados dentro de cada sala de aula, respeitando as normas de Metodologia de Avaliação da Qualidade do Ar (APA, 2015a). Assim, foram assegurados: o afastamento mínimo de 1 a 2 m de janelas, armários, divisórias; a colocação a uma altura do solo de 1,5 m; o distanciamento mínimo de 1 m de fontes como fotocopiadoras e impressoras, não colocando os sensores por baixo de aquecedores, ventoinhas ou difusores. É importante destacar, ainda, que o Dustrack foi calibrado na fábrica, em 2018.

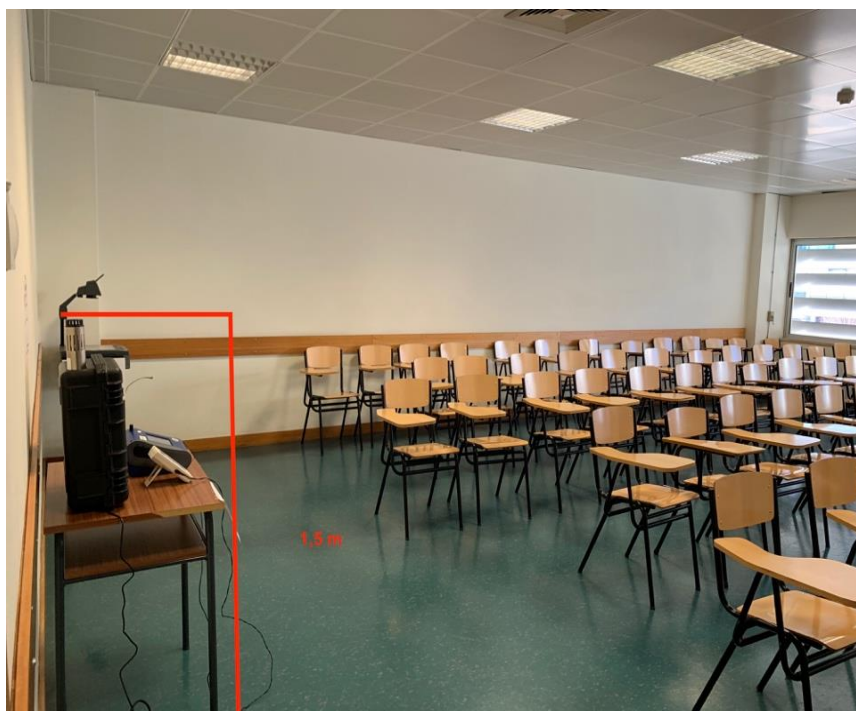
Na Figura 9 é possível observar os equipamentos utilizados para o estudo em questão.

Figura 9 — TSI DustTrak DRX, fotometro GrayWolf sensor e Formaldemeter.



Pode-se observar na Figura 10, a localização dos equipamentos, bem como a sua altura em relação ao solo.

Figura 10 — Localização do equipamento na sala de aula.



3.2.2. Amostragem Passiva

A amostragem passiva consiste na utilização de amostradores passivos (tubos de difusão) para a recolha de amostras relativas a aldeídos e compostos orgânicos voláteis (COVs). As amostras dos aldeídos e dos COV's foram recolhidas com recurso a um dispositivo passivo de amostragem, Radiello®. Este dispositivo consiste num cartucho, contendo uma substância 2,4-DNPH (2,4-dinitrophenylhydrazine) que reage com os aldeídos, formando e retendo um produto da reação (2,4-dinitrophenyllhydrazones).

Com o objetivo de obter a concentração média dos poluentes acima mencionado nas salas, e de modo a manter as condições necessárias para absorver a massa poluente suficiente nos cartuchos, foram utilizados dois tubos de difusão durante uma semana escolar em cada sala de aula, de segunda a sexta, todos na mesma semana do ano.

Foram quantificados 9 tipos de aldeídos, a mencionar: formaldeído, acetaldeído, acroleína, propanal, butanal, pentanal, isopentanal, hexanal, benzaldeído; e ainda 10 tipos de COV, a referir: benzeno, tolueno, estireno, tetracloroetileno, tricloroetileno, m-xileno, o-xileno, p-xileno, 1-4 diclorobenzeno, alfa-pineno.

É importante destacar que estes dispositivos permaneceram nas salas durante o período de uma semana, portanto os valores dizem respeito ao período não ocupado e ocupado. Após a recolha da amostragem, os cartuchos de Radiello foram enviados para análise no Instituto Clinici Scientifici Maugeri, Centro Ricerche Ambientali, na Itália.

As amostras foram mantidas devidamente acondicionadas, garantindo as circunstâncias de temperatura adequadas ($<4^{\circ}\text{C}$) sendo, posteriormente, enviadas para análise.

Os limites de detecção podem ser observados na Tabela 10.

Tabela 10 — Limites de detecção para as substâncias analisadas

Substância	Limite de Detecção
Formaldeído	$0,075 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Acetaldeído	$0,178 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Tolueno	$1,30 \mu\text{g}/\text{m}^3$
p-xileno	$1,80 \mu\text{g}/\text{m}^3$
d-limoneno	$2,80 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Tetracloroetileno	$2.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Naftaleno	$4,40 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Já a Figura 11 demonstra a localização dos amostradores passivos nas salas de aula.

Figura 11 — Localização dos suportes dos amostradores passivos numa sala de aula.



3.2.2.1 Equipamentos utilizados

A Tabela 11 expõe as características dos equipamentos utilizados nesta amostragem passiva.

Tabela 11 — Equipamentos utilizados para medições de 9 aldeídos selecionados e 10 concentrações de COV (amostradores passivos)

Fonte: Adaptado de ClimACT (2017)

Descrição do equipamento	Caraterísticas / Precauções
Triângulo Suporte plates 	Serve de suporte para a utilização e encaixe dos amostradores de difusão radial Proteção dos tubos de Radiello Foram colocados no teto das salas de aula.
Amostradores de difusão do tipo radial 	Aldeídos: A amostragem de aldeído foi realizada usando cartuchos à base de 2,4-dinitrofenil-hidrazina (Radiello®: corpo difusivo código 120-1 e código de cartucho 165, Sigma-Aldrich Inc., Milano, Itália) COV: Amostragem de COV foi conduzida com base em Carbograph cartuchos (Radiello®: corpo difusivo código 120-2 e cartucho código 145, Sigma-Aldrich Inc., Milano, Itália)

CAPÍTULO 4 — Resultados e Discussão

4.1. Conforto Térmico

De modo a proceder à avaliação e discussão dos principais critérios do conforto térmico, podemos verificar, por um lado, os resultados médios de Temperatura (°C) na Tabela 12, e, por outro lado, os valores relativos à Humidade relativa (HR) para cada sala de aula, na Tabela 13.

Tabela 12 — Resultados da Temperatura média das salas de aulas

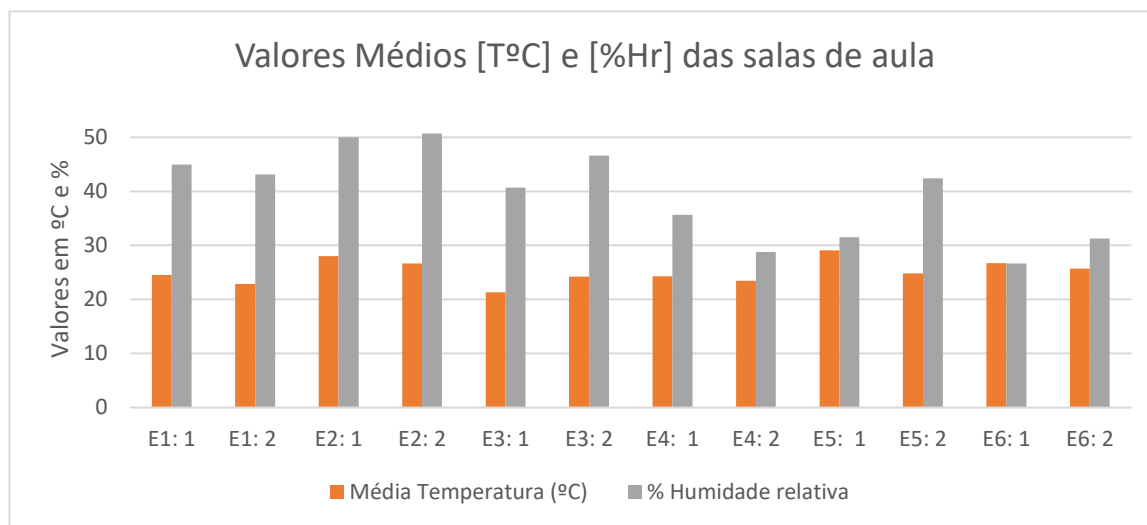
T °C	E1:1	E1:2	E2:1	E2:2	E3:1	E3:2	E4:1	E4:2	E5:1	E5:2	E6:1	E6:2
Média	25	23	28	27	21	24	24	23	29	25	27	26
Mínimo	22	20	21	17	19	17	23	18	26	23	24	22
Máximo	25	24	30	28	23	26	26	28	31	26	28	28

Tabela 13 — Resultados da Humidade relativa (HR) média das salas de aulas

HR %	E1:1	E1:2	E2:1	E2:2	E3:1	E3:2	E4:1	E4:2	E5:1	E5:2	E6:1	E6:2
Média	45	43	50	51	41	47	36	29	32	42	27	31
Mínimo	37	38	32	35	30	35	25	20	18	30	20	24
Máximo	51	54	53	57	52	53	42	43	37	53	35	41

A temperatura variou até ao máximo de 31°C, observados na sala E5:1. Esta sala fazia parte de uma escola sem sistema de ventilação mecânico, que teve a sua campanha de monitorização no mês de maio.

O valor mínimo observado é de 17°C, nas salas 2 das escolas 2 e 3. As restantes temperaturas observadas variaram entre 21°C-27°C, sendo que 42% das salas não se encontram dentro do intervalo de conforto térmico preconizado pela ISO 7730/2005. Na Figura 12 apresentam-se os resultados médios de ambos os parâmetros.

Figura 12 — Gráfico Valores médios da Temperatura e Humidade Relativa

A Humidade relativa (HR) apresenta valores entre 27% e 51%, indicando que quase todas as salas se encontram localizadas na faixa considerada como sendo ótima, compreendida entre 30% a 60% (Hamehkasi, 2016). Já no que diz respeito à ISO 7730, é-nos indicado que a HR do ar se deve situar entre os 30% e os 70%. De uma forma geral, os valores de HR do ar estão compreendidos entre os limites inferior e o superior. No entanto, a E6:1 e a E4:2 apresentaram um percentual de HR de 27% e 28% respetivamente, valores ligeiramente abaixo do limite inferior. É importante destacar que uma HR fora dos parâmetros considerados como aceitáveis pode causar desconforto nos ocupantes, tal como secura das mucosas (olhos, garganta e nariz) para uma H_R baixa, ao passo que uma HR elevada pode trazer problemas respiratórios e reações alérgicas.

A maioria das escolas não possuía calefação, sendo que apenas uma detinha ventilação mecânica, designadamente a Escola 6. Esta ausência pode ter sido a causa das baixas temperaturas mínimas de 17°C, observadas nas escolas 2 e 3. As restantes escolas possuíam ventilação natural, o que possivelmente pode ter contribuído para os valores adequados de temperatura, face à estação do ano do estudo. No entanto, devido à inexistência de dados da temperatura no exterior não é possível evidenciar esta relação.

A maioria das salas de aulas estavam equipadas com quadro de lousa e piso de Linóleo e possuíam um volume médio de 150,5 m³.

Em relação à taxa de ocupação, a Tabela 14 resume os resultados da mesma.

Tabela 114 — Resultados para taxa de ocupação (%)

%Tx	E1:1	E1:2	E2:1	E2:2	E3:1	E3:2	E4:1	E4:2	E5:1	E5:2	E6:1	E6:2
Ocupação	50	54	96	65	75	82	60	62	75	73	62	41

O intervalo da taxa de ocupação varia entre 41% para a E6:2 e 96% para E2:1. No geral, exceto numa sala (E2:2), os valores estão dentro do limite da Direção Geral do Ensino, que estabelece como limite 90%.

A taxa de ocupação que estabelece, em termos médios, a relação entre o número de lugares ocupados e o número de lugares existentes de um espaço, de acordo com a sua tipologia foram calculados e comparados de acordo com os valores de referência utilizados pela DGES. Estes valores encontram-se expostos na Tabela 15.

Tabela 15 — Valores de Referência utilizados pela DGES para Taxa de Ocupação

Ambiente Escolar	Relação nº lugares ocupados / nº lugares existentes
Sala de Aula (Ensino Teórico)	90 %
Anfiteatros de Ensino	80 %
Salas de Informática	80 %
Laboratórios de Ensino	80 %

4.2. Poluentes Físico-Químico

A Tabela 16 apresenta o resumo da média de todos os resultados para o período ocupado do CO, CO₂, COVT, PM_{2.5} e PM₁₀. Ao longo deste capítulo, os resultados serão discutidos de forma individual e analisados através de séries temporais.

Em geral, os resultados destes compostos mostram uma qualidade aceitável. No entanto, quando analisados ao longo do dia, foi possível identificar diversas situações, em que os valores limites de referência foram excedidos em alguns períodos.

Tabela 16 — Resumo de resultados médios obtidos para CO₂, CO, COVT, CH₂O, PM_{2.5} e PM₁₀

Poluente		E1:1	E1:2	E2:1	E2:2	E3:1	E3:2	E4:1	E4:2	E5:1	E5:2	E6:1	E6:2
PM ₁₀ μg/m ³	Média	33	34	46	20	59	89	66	59	18	15	21	24
	Min.	18	24	1	37	9	37	23	1	13	13	3	9
	Máx.	262	46	917	200	302	244	181	899	27	19	132	97
PM _{2.5} μg/m ³	Média	28	26	29	15	30	54	41	37	12	14	16	18
	Min.	15	20	13	28	7	28	22	18	8	12	2	8
	Máx.	112	33	542	94	126	117	93	494	16	16	69	81
CO ₂ ppm	Média	897	1015	1555	1014	1352	1570	1283	560	809	918	1280	1095
	Min.	400	670	462	748	412	748	473	384	457	415	449	458
	Máx.	1770	1639	4102	2043	5590	2989	3011	918	4618	2899	2222	2493
CO (ppm)	Média	0,49	1,13	1,12	0,51	0,21	0,75	0,23	0,40	0,20	0,20	0,46	1,03
	Min.	0,30	0,30	0	0	0	0	0,08	0	0,12	0,27	0,33	0,60
	Máx.	0,70	1,30	1,80	0,97	0,70	1,50	0,50	1,00	0,57	0,20	0,80	1,60
COVT μg/m ³	Média	261	494	407	379	284	349	354	275	408	274	283	305
	Min.	211	340	317	294	226	294	257	193	284	204	245	213
	Máx.	599	871	482	551	459	599	515	631	482	515	329	422
CH ₂ O μg/m ³	Média	-	19	41	36	36	50	45	23	29	6	24	282
	Min.	-	6	7	-	7	17	-	4	1	1	9	-
	Máx.	-	34	76	91	207	147	101	100	108	7	73	921

Observa-se, ainda, que os sistemas de ventilação natural não foram suficientes para reduzir os níveis de poluentes em determinados períodos de tempo. Apesar da inexistência de registos das ações de limpeza efetuadas nas salas, considera-se que estas ações podem ser uma possível causa, face aos resultados obtidos.

Note-se, igualmente, que os poluentes que ultrapassam os valores-limite com maior frequência e intensidade são CO₂ e PM.

4.2.1. Compostos orgânicos voláteis totais

A Tabela 17 apresenta os resultados dos valores mínimos, médios, e máximos obtidos na monitorização dos compostos orgânicos voláteis totais. Os resultados finais das concentrações encontram-se em equivalentes de tolueno, e são expressos em $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Os intervalos de valores médios de COVT oscilaram entre 254 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 408 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, situando-se dentro dos valores limites preconizados na Legislação Portuguesa (600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) através da Portaria 353-A/2013, de 4 de dezembro de 2013. O resultado do valor médio de todas as escolas nesta pesquisa foi de 319,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ com um desvio padrão de 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sendo assim abaixo do limite.

Tabela 17 — Resultados COVT para valores mínimos, médios e máximos em $\mu\text{g}/\text{m}^3$

[COVT] $\mu\text{g}/\text{m}^3$	E1:1	E1:2	E2:1	E2:2	E3:1	E3:2	E4:1	E4:2	E5:1	E5:2	E6:1	E6:2
Mínimo	211	340	317	294	226	294	257	193	284	204	245	213
Média	261	494	407	379	284	349	354	275	408	274	283	305
Máximo	599	871	482	551	459	599	515	631	482	515	329	422

Podemos observar ainda que um total de três salas, na Escola 1,2 e 5, apresentam valores médios superiores à média geral de todas as salas (319,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). A E2:1 acarreta o valor de 407 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Na E2:2 observamos um valor de 379 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Estes resultados justificam-se em função do tipo de atividade desempenhada dentro da sala de aula, que tem influência direta na concentração do composto. Vale destacar a utilização de ambientadores na sala E2:1 que pode influenciar os resultados dos valores obtidos.

Atividades como as artes plásticas podem estar na origem das fontes de emissão, através da utilização de produtos ligados a atividades desta tipologia. O uso de marcadores e colas pode ser identificado como outra fonte de emissão, advindo do facto de estarmos perante salas de aula com alunos mais novos, com uma maior percentagem de taxa de ocupação (96%) e que, segundo os registos, realizaram trabalhos manuais para fins de aprendizagem.

Na sala E5:2, ocorreram registos de atividades manuais no âmbito da comemoração do aniversário da escola. Verifica-se, por outro lado, que na sala E5:1, que manteve apenas atividades letivas normais, houve valores médios mais altos ($408 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Em suma, os valores médios das salas de aula não foram ultrapassados de acordo com o valor limite de $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ da Portaria 353-A/2013, de 4 de dezembro de 2013. Apesar de não haver escedências do valor limite, algumas salas apresentam valores mais elevados, os quais são merecedores de especial atenção no que respeita à melhoria da qualidade do ar interior.

O diagrama de caixa da Figura 13 relaciona os valores dos mínimos, média, máximo e os quartis de todas as escolas.

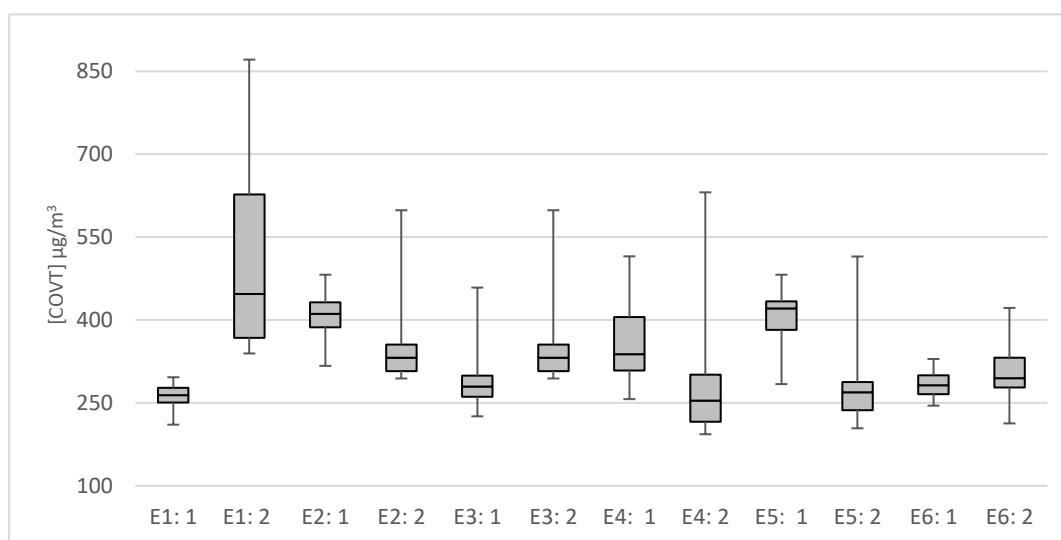


Figura 13 — Diagrama de Caixa [COVT] para todas as escolas

Para além de existir uma grande dispersão entre os resultados dos valores mínimos e máximos obtidos, é possível concluir que a sala E1:2 é aquela que possui um valor máximo superior às restantes. Através da análise temporal das respetivas concentrações, é possível verificar que estes valores são pontuais e que representam uma possível influência dos indivíduos para estas exceções. Isto foi, aliás, reportado através dos registos realizados pelos professores e pelo trabalho *in loco*.

Pela observação da Figura 14, apresentada a seguir, verifica-se que os picos máximos de $871 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ocorrem durante o período de possível visita breve de um segundo professor à sala. Este pico ocorre num intervalo de 10 minutos, onde é possível destacar a subida acentuada da concentração que, rapidamente, regista um aumento de $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ até perfazer o valor máximo de $871 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

No entanto, verifica-se, ainda, que fora do período de ocupação, os valores de COVT

permanecem abaixo do limite regulamentar de $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Assim, os elevados valores de COVT podem ter sido causados pelos próprios estudantes e professores, resultantes possivelmente de substâncias como perfumes e loções corporais.

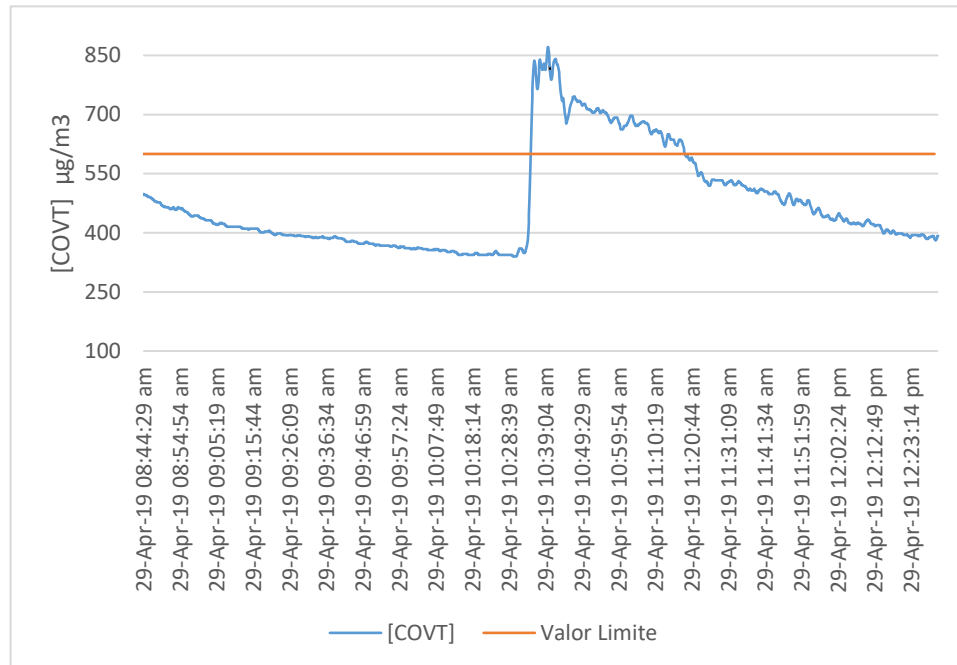
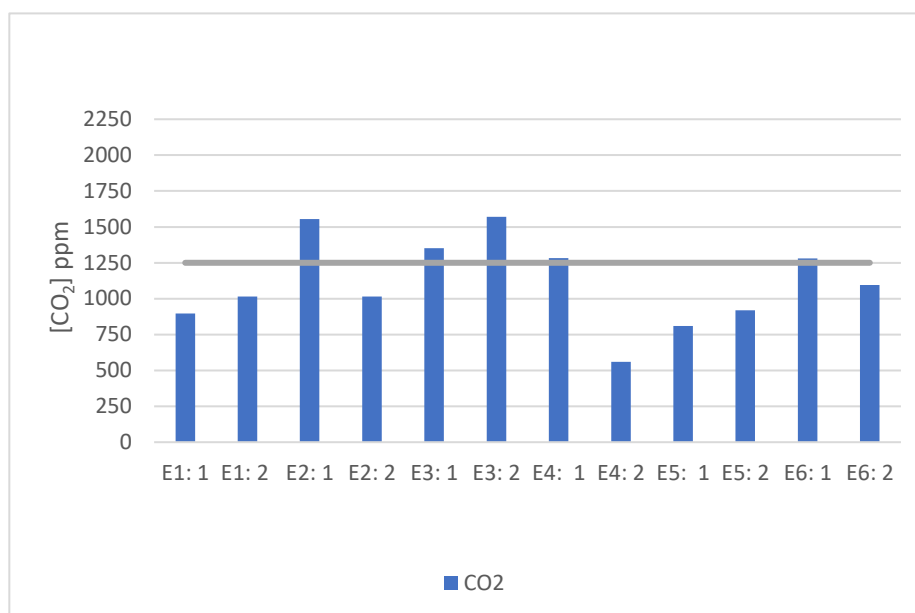


Figura 14 — Série temporal [COVT] na sala E1:2

Outra razão para esta ocorrência pode ser justificada pelo facto de não se verificarem abertura de janelas. De enfatizar que, nos dias seguintes, há registo de abertura de portas e janelas, acompanhada de uma diminuição drástica do valor em análise.

4.2.2. Dióxido de Carbono

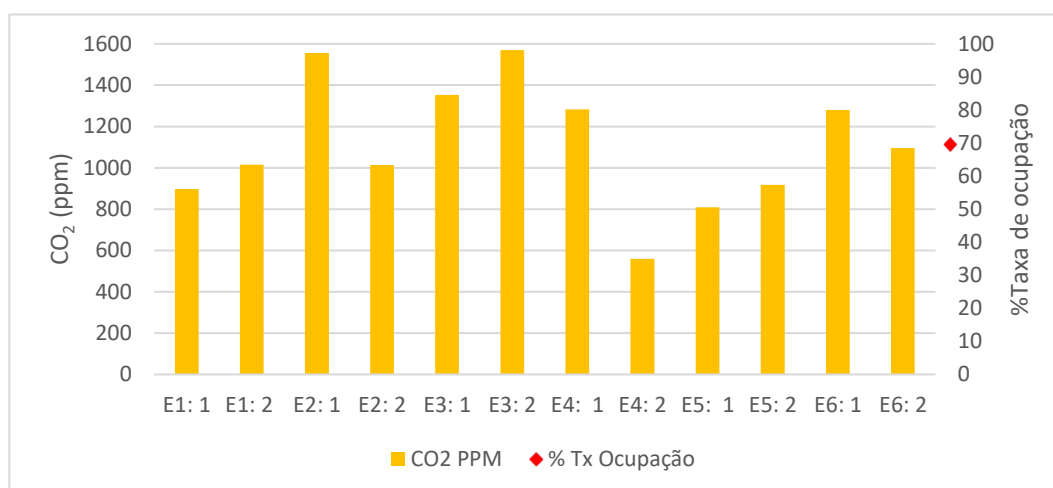
O parâmetro ambiental que apresentou resultados mais significativos foi o CO_2 , já que tem como principal origem a ocupação humana. Como é possível visualizar na Figura 15, as Escolas 2, 3, 4 e 5 ultrapassam os valores limite de 1250 ppm da Portaria 353-A/2013 de 4 de dezembro de 2013. O número elevado de alunos nas salas e a ventilação insuficiente, por sua vez, contribuem para a concentração de dióxido de carbono.

Figura 15 — [CO₂] e Valor Limite.

As concentrações médias de CO₂ no interior das salas de aula estiveram acima do limite da Portaria 353-A/2013, de 4 de dezembro de 2013, em 5 das 12 salas, alcançando níveis de 1570 ppm na E3:2. Estes dados vão de encontro com os resultados obtidos no projeto SINPHONIE, onde a exposição a CO₂ variou de 269 ppm a 4957 ppm, em contexto de escolas (Csobod et al., 2014).

O dióxido de carbono é um poluente atmosférico preocupante, podendo provocar efeitos nocivos no bem-estar humano. Todavia, a sua principal fonte interior de emissão poderá ser criada pelo processo de expiração dos ocupantes, ou pela combustão incompleta nas proximidades.

Na Figura 16, podemos observar a relação entre a taxa de ocupação das salas e a concentração de CO₂. Assim, vemos que as E2:1 e a E3:2 são aquelas que possuem taxas de ocupação superiores a 80% e, como seria de se esperar, são as que apresentam valores médios de CO₂ mais elevados, de 1555 ppm e 1570 ppm, respetivamente.

Figura 16 — [CO₂] e % Taxa de ocupação

Nesta investigação, uma questão relevante que corrobora a necessidade de ventilação natural é a relação observada entre a E3:1 e a E5:1. Apesar de ambas possuírem a mesma taxa de ocupação (75%), contêm valores diferentes de CO₂. A primeira possui níveis médios de 1352 ppm, enquanto que a E5:1 manteve uma média de 809 ppm.

Esta diferença é elucidada através dos registos de atividade — a E3:1 registou poucas aberturas de janelas, ao passo que a E5:1 tinha as suas janelas frequentemente abertas. O facto de, no caso de temperaturas exteriores mais baixas (como é o caso do inverno), a ventilação da sala de aula pela abertura da janela ser desencorajada, tal tem consequências nos níveis de CO₂ nas salas de aula.

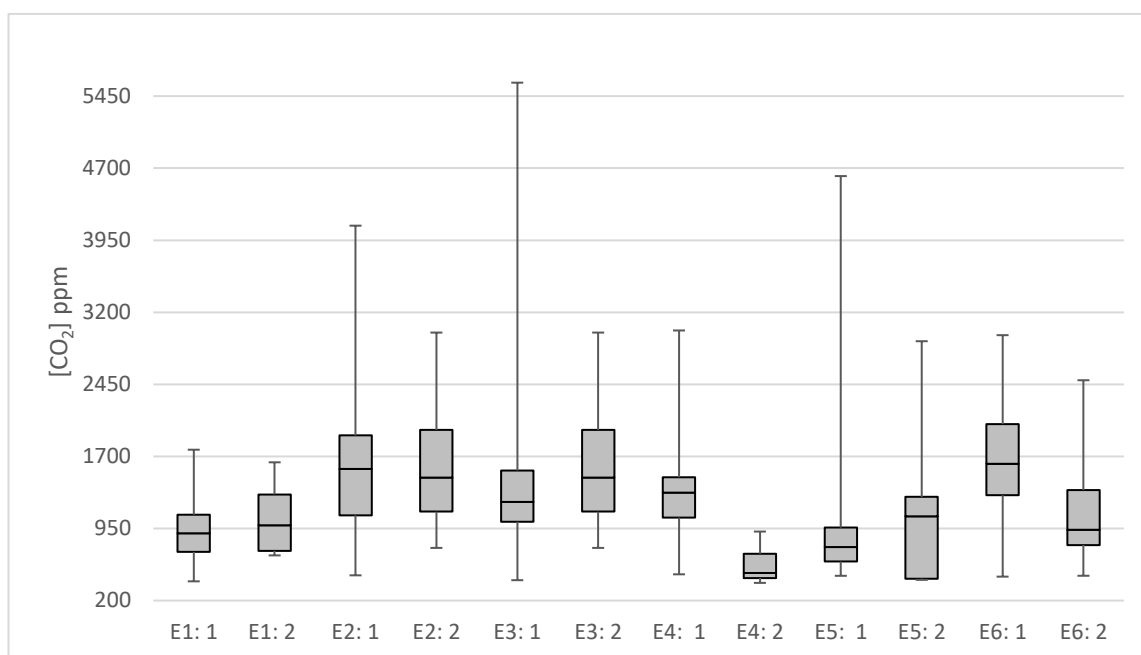
A idade dos estudantes e a sua relação com a atividade metabólica também são fatores relevantes para a QAI e a concentração de CO₂ em ambientes interiores (Almeida et al., 2011). Esta ligação fica clara ao analisar-se a diferença nos níveis de CO₂ das duas salas de aula da Escola 4.

A sala 2 da Escola 4 é aquela que possui os valores médios de CO₂ mais baixos, de 559 ppm. Já a sala 1 apresenta níveis de CO₂ médios de 1283 ppm. Estes resultados poderão ser explicados pelo facto de a sala 2 ser composta por alunos mais novos e a sala 1 ser onde se encontram os alunos mais velhos, isto é, com idades superiores a 12 anos. A diferença de valores pode ser explicada pela relação entre a idade, o metabolismo e a produção de biofluentes, relação encontrada em vários estudos consultados (Al horr et al., 2016; Annesi-Maesano et al., 2013; Blondeau et al., 2005).

A análise dos gráficos box-plot expostos na Figura 17, na qual estão representadas as concentrações de CO₂ em todas as escolas e salas de aula, permite constatar que as Escolas 2 e 3 têm valores mínimos superiores às outras (por volta dos 1000 ppm). Simultaneamente, observam-se diferenças significativas quando se comparam os valores máximos.

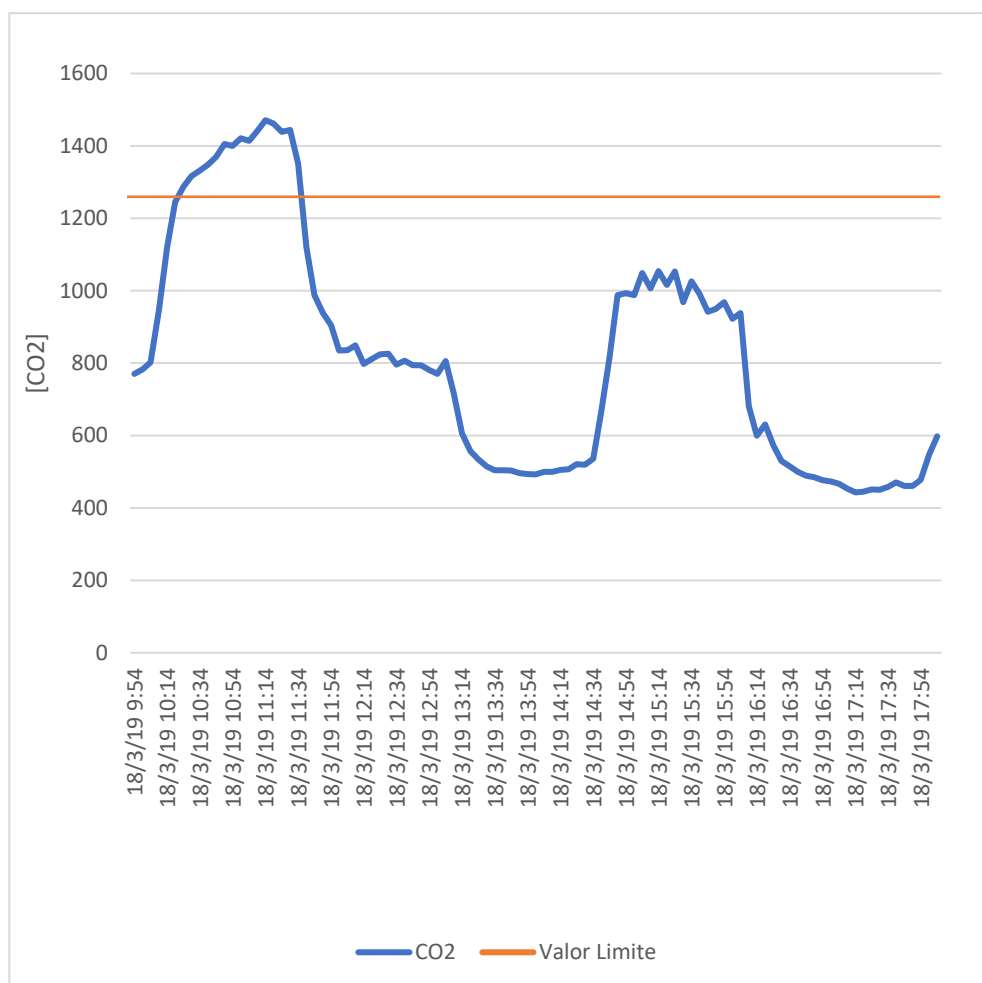
Outro aspeto interessante a evidenciar são as diferenças entre salas da mesma escola, nomeadamente nas Escolas 4 e 6. Estas salas demonstram valores máximos e de mediana em faixas amplamente diferentes, sendo justificados pelas questões anteriormente discutidas, especificamente, relativas à faixa de idade e à existência de ventilação natural.

Figura 17 — Diagrama de Caixas [CO₂] de todas as salas



A Figura 18 apresenta os resultados da sala E6:2, onde é possível constatar, de forma clara, os picos de maior concentração de dióxido de carbono durante os horários ocupados pelos alunos, comprovando a influência humana neste aumento.

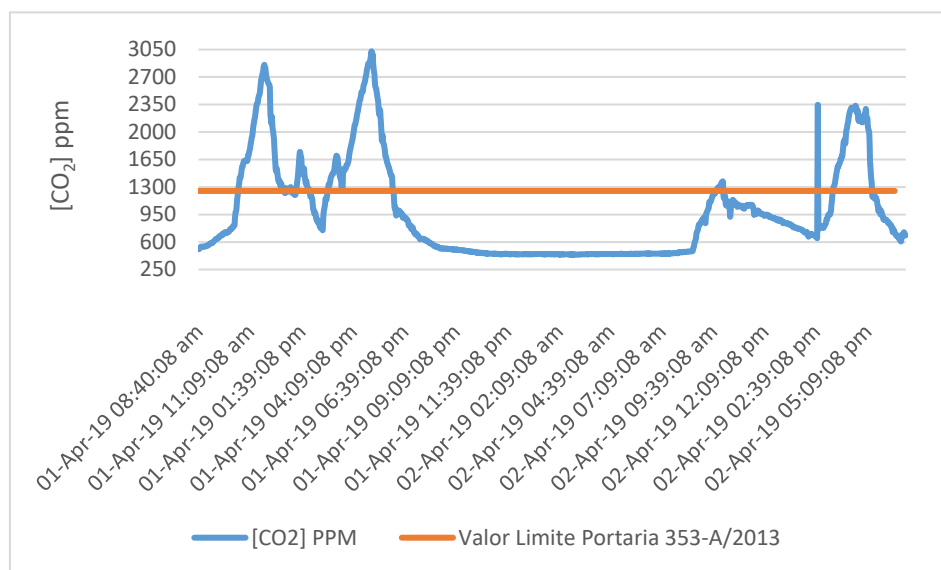
Podemos observar que, por várias vezes, os valores ultrapassam o limite de 1250 ppm. Visto que esta escola se tratava da única escola com ventilação mecânica, os dados sugerem que a ventilação não estava adequada e, conseqüentemente, o CO₂ continua a ser um problema nas salas de aula. Face aos resultados obtidos e uma vez que este parâmetro é o principal indicador das condições de renovação de ar em espaços fechados, verifica-se a existência de uma renovação de ar deficiente no interior da generalidade das salas de aulas. O volume das salas, associada ao número de estudantes das salas, no geral, não permitiu que o arejamento destes espaços fosse suficiente durante os intervalos para diminuir os níveis de CO₂ para valores aceitáveis.

Figura 18 — Série temporal [CO₂] E6:2

Através da análise da Figura 18, podemos verificar que, apesar de a E6:2 não ser a sala com maior taxa de ocupação média ao longo do estudo (41%), a ocorrência de abertura de portas e janelas, e a existência de um sistema de ventilação mecânico não foram suficientes para garantir uma boa renovação do ar num determinado período de tempo.

Através da Figura 19 podemos verificar a evolução temporal da campanha na sala E3:2. Destacam-se a presença de dois picos de elevada concentração de CO₂, nos quais o valor limite (1250 ppm) é excedido durante um período aproximado de duas horas. Estes valores correspondem a períodos de ocupação registado pelos professores.

O primeiro pico no valor de 2691 ppm acontece após o início das aulas, por volta das 11 horas da manhã. O valor começa a diminuir sempre próximo da hora do almoço, às 13h30. A meio da tarde, após o intervalo, aproximadamente às 17h, existe um segundo pico ligeiramente superior, que atinge um valor de 3050 ppm.

Figura 19 — Série temporal [CO₂] E3:2

A concentração de CO₂ altera-se ao longo dos diferentes períodos de ocupação da sala de aula, de forma teoricamente previsível — tanto para o aumento da concentração de CO₂ na sala durante o tempo de ensino, como para a diminuição da concentração de CO₂ durante os intervalos e o período não ocupado. Através das Figuras 20 e 21 é possível acompanhar claramente estas alterações, onde se pode constatar uma diminuição de concentração brusca à saída dos estudantes durante o intervalo, ocorrendo um aumento dos valores da concentração de CO₂ durante o decorrer das aulas, resultante da influência na produção de bioefluentes pelos ocupantes das mesmas.

Observa-se através dos resultados que sempre que há um declínio na concentração de CO₂, verifica-se, através dos registos, a abertura de janelas ou portas. Ou seja, a ventilação natural certamente poderá ter contribuído para que os níveis de concentração se tenham mantido dentro dos padrões limite da Portaria 353-A/2013, de 4 de dezembro de 2013.

Figura 20 — Série temporal [CO₂] E2:1

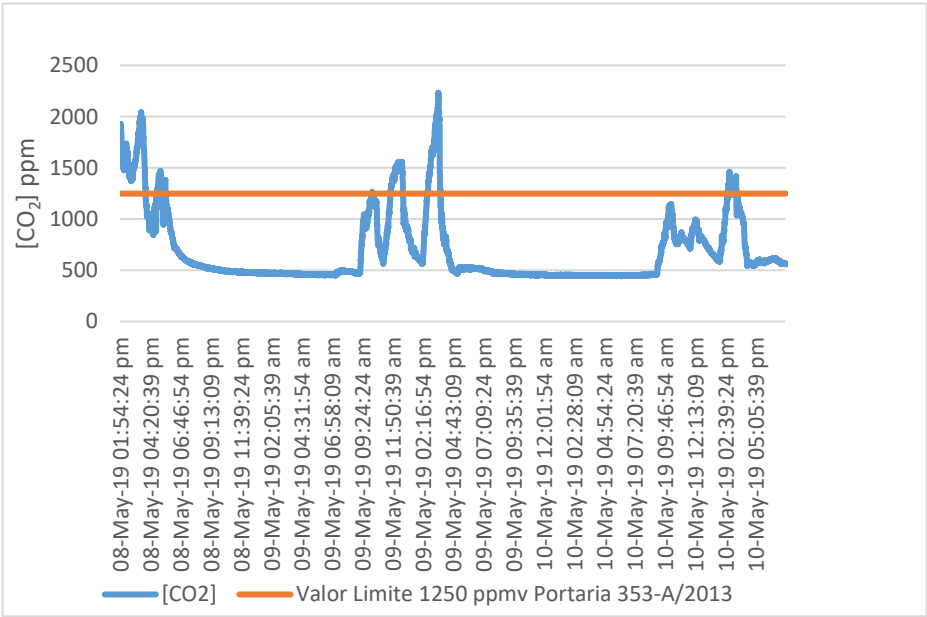
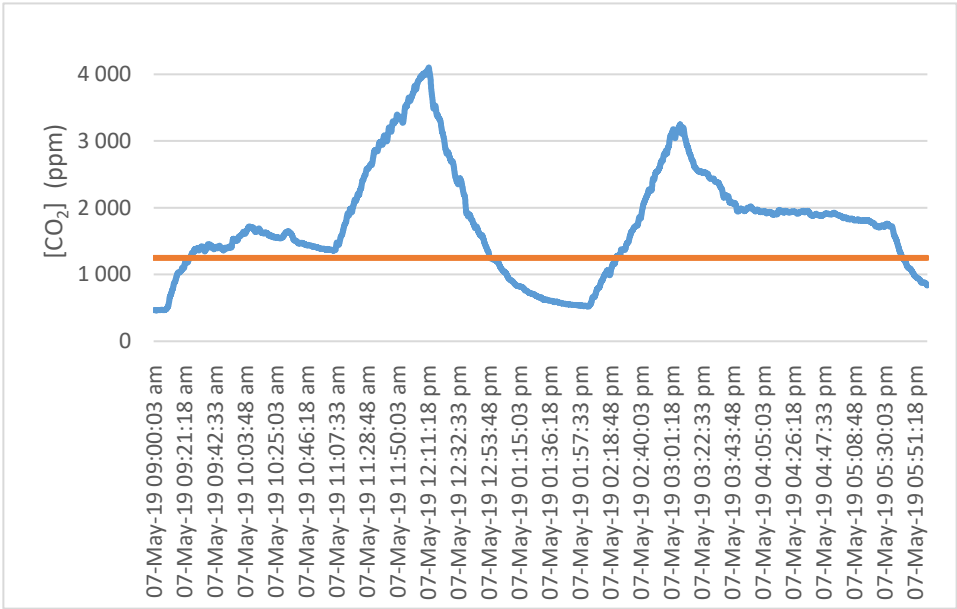


Figura 21 — Gráfico Série temporal [CO₂] E2:1



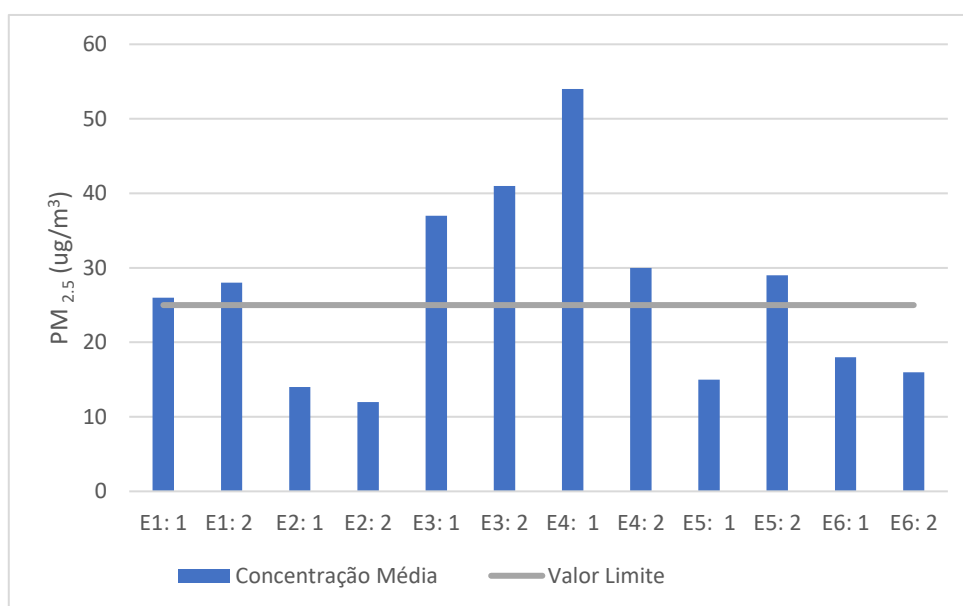
4.2.3. Material Particulado (PM_{2.5})

Os dados deste parâmetro foram analisados, conjuntamente com a taxa de ocupação e aberturas e fechos de janelas, de forma a determinar quais os fatores que afetariam a concentração do PM.

Conforme pode ser observado na Figura 22, adotando-se o limite preconizado na Legislação Portuguesa de 25 µg/m³, podemos verificar que apenas as escolas 5 e 6 não ultrapassaram o respetivo valor limite. No entanto, se utilizarmos como referência o valor guia estabelecido pela OMS, de 10 µg/m³, observam-se excedências em todas as escolas analisadas.

Tal como já verificado em outros estudos (Almeida et al., 2011; Blondeau et al., 2005) verifica-se que os valores de PM_{2.5} foram pouco influenciados pela ocupação humana, visto que as escolas com maiores taxas de ocupação não apresentam valores elevados de PM_{2.5}.

Figura 22 — [PM_{2.5}] e Valor Limite.



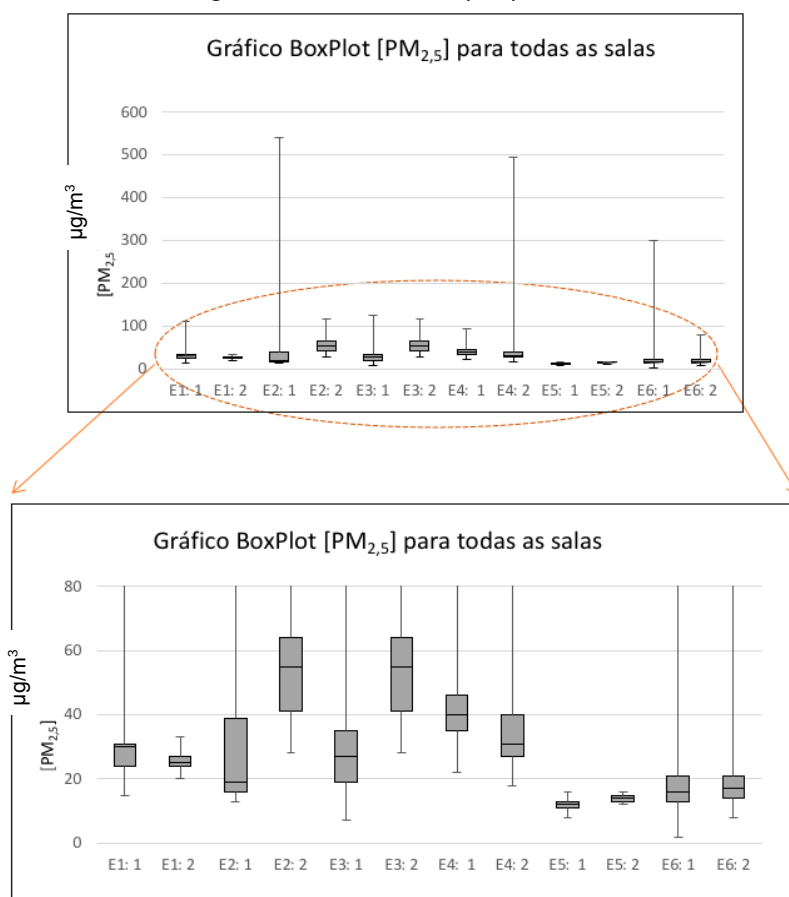
A Tabela 18 apresenta os valores médios, máximos e mínimos de todas as salas e escolas, com os números em **negrito** demonstrando os valores anómalos e excedentes ao VL da Portaria 353/2013, de 4 de dezembro de 2013, de 25 µg/m³. Somente 5 de entre as 12 salas analisadas é que apresentam teores de PM_{2.5} abaixo do valor limite.

Observam-se picos de valores máximos de 542 e 494 µg/m³, na E2:1 e na E4:2, respetivamente.

Tabela 128 — Valores médios, mínimos e máximos de $[PM_{2.5}]$

$[PM_{2.5}]$ $\mu g/m^3$	E1:1	E1:2	E2:1	E2:2	E3:1	E3:2	E4:1	E4:2	E5:1	E5:2	E6:1	E6:2
Média	28	26	29	15	30	54	41	37	12	14	16	18
Mínimo	15	20	13	28	7	28	22	18	8	12	2	8
Máximo	112	33	542	94	126	117	93	494	16	16	69	81

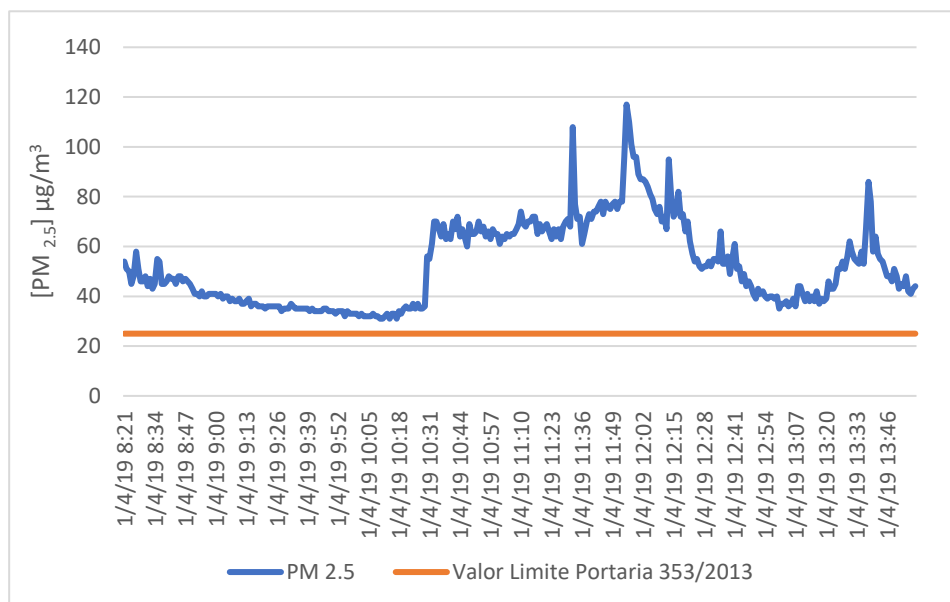
Na Figura 23 são apresentados os resultados em diagrama de caixas para o $PM_{2.5}$. Atenção deve ser dada a algumas salas, tais como E2:2 e E3:2, E4:1 e E4:2, que apresentam valores médios superiores ao VL de $25 \mu g/m^3$.

Figura 23 — Gráfico Box-plot para o $PM_{2.5}$ 

Semelhante ao que ocorrera com as concentrações de CO_2 , os níveis de $PM_{2.5}$ também apresentam variações ao longo do dia. Na Escola 3 (sala 2), por exemplo, podemos observar uma situação preocupante, na qual se verificam concentrações acima do VL para $PM_{2.5}$, durante todo o período analisado. Além disso, observamos picos que superam em quase 30 vezes o VL da Portaria 353/2013, de 4 de dezembro de 2013, de $25 \mu g/m^3$,

nomeadamente, em dois momentos no final da tarde, sempre próximo às 18h, e em dois dias distintos, o que poderá ser o momento da limpeza da sala.

Figura 24 — Série temporal [PM_{2.5}] E3: 2



Através do gráfico da E3:2 na Figura 24, podemos observar os resultados da série temporal para o PM_{2.5}. A sala mantém-se sempre acima do valor estabelecido pela Portaria 353-A/2013, de 4 de dezembro de 2013, de 25 µg/m³, contendo dois picos grandes de subida de concentração que correspondem, possivelmente, a estes dois picos, de valores que excederam sempre o VL, ocorreram às 18h39 e o segundo às 17h59. Estes momentos coincidem, por um lado, com o fim das atividades letivas (saída dos alunos), proporcionando a ressuspensão das partículas já existentes na sala, e, por outro lado, com o período de e da limpeza das salas ao final do dia.

A referir, também, que em nenhum momento durante o período de estudo, esta sala conseguiu cumprir com o estabelecido pela legislação. Esta situação pode advir de diversos fatores. Um deles, poderá ser a disposição das salas de aula, que são relativamente inferiores ao nível do solo circundante e onde a diminuição do relevo tem influência na afluência do material particulado vindo do exterior. Outro fator explicativo poderá estar relacionado com a localização da escola, isto é, de estar próxima a dois eixos de via rápida com grande afluência de trânsito.

Através dos registos dos professores pode-se concluir que houve abertura de portas e janelas, podendo ter influenciado o facto do valor mínimo registado ser de 28 µg/m³. Podemos observar ainda valores próximos a 100 µg/m³, cinco vezes acima do valor permitido, durante uma significativa parte do dia. Neste aspeto, podemos, assim, concluir que a QAI está

comprometida ao longo do período de análise.

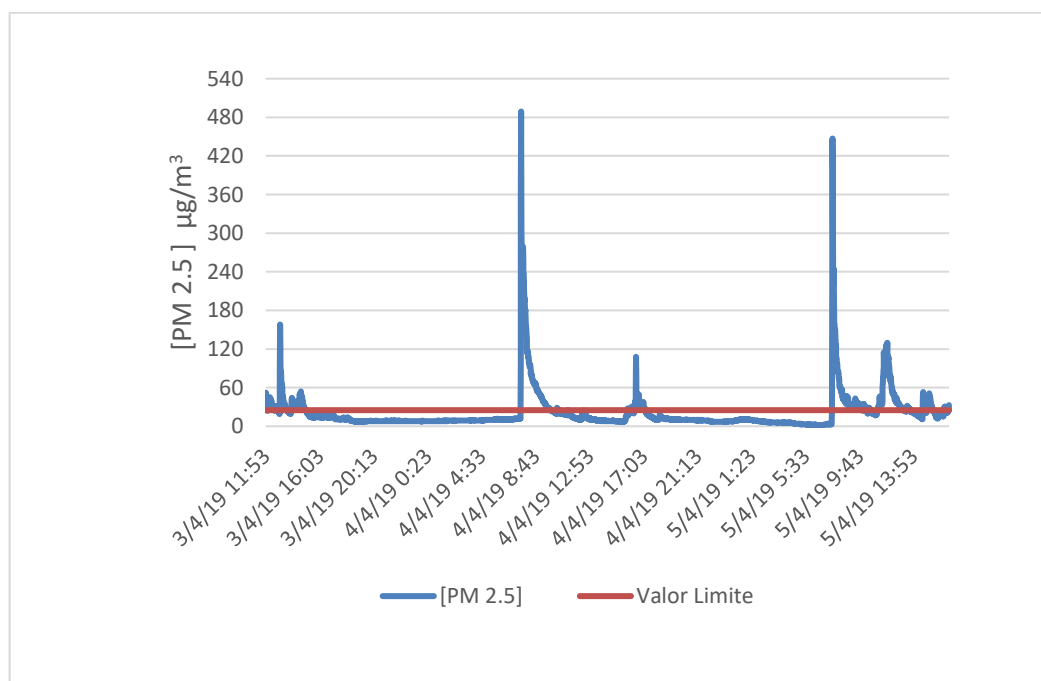
O $PM_{2.5}$, quando inalada, consegue transportar-se através da corrente sanguínea e depositar-se nos brônquios do pulmão, promovendo, assim, doenças cardiopulmonares e cancro.

A sala E3:1 também apresentou valores excedentes sempre à mesma hora, 7h30 da manhã, correspondente ao período da limpeza da sala. Apesar de as salas serem ambas na mesma escola, estão localizadas em pavilhões diferentes e possuem equipas responsáveis pela limpeza com procedimentos diferentes — enquanto a limpeza da sala 2 realiza-se durante a manhã, na sala 1, a limpeza é efetuada após o fim do dia. Podemos concluir que a limpeza sendo efetuada no período final das atividades letivas promove uma melhor QAI.

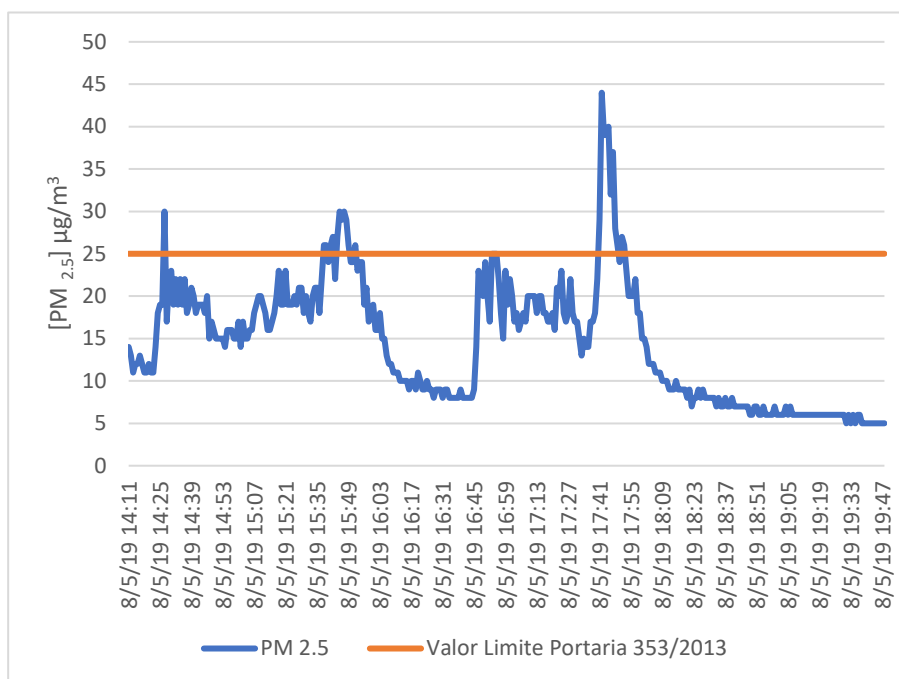
Através do gráfico da Figura 25 é possível, também, observar 4 picos de excedência, sendo que 2 deles correspondem ao período da limpeza mencionado acima; os outros 2 correspondem ao período de início das atividades letivas e a entrada dos alunos nas salas de aula. Esta entrada dos alunos, além de influenciar a concentração da PM, com a dispersão dos mesmos através dos sapatos, pode ainda influenciar também a ressuspensão das partículas existentes nas salas.

Podemos concluir ainda que, apesar de os registos da sala 1 não estarem completos, é possível concluir, através dos valores registados pelos equipamentos, que não houve abertura de janelas, já que o valor mínimo registado é de $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, e na maioria do período de análise, fora do intervalo do início das aulas e da limpeza, permanece abaixo do Valor Limite.

Figura 25 — Série temporal [$PM_{2.5}$] sala E3:1

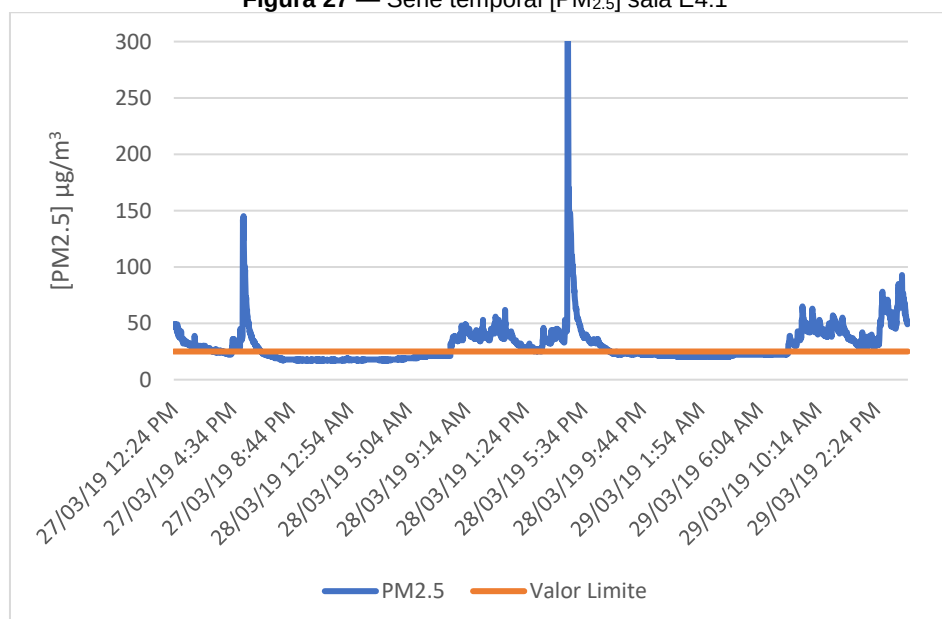


A E2:2 também apresentou resultados excedentes para as partículas em suspensão, os quais estão expostos na Figura 26.

Figura 26 — Série temporal [PM_{2.5}] sala E2:2

A Figura 27 mostra as concentrações de PM_{2.5} na E4:1, onde podemos observar teores acima de 25 µg/m³ em grande parte do período analisado. Além disso, são verificados momentos em que os níveis atingem 365 µg/m³.

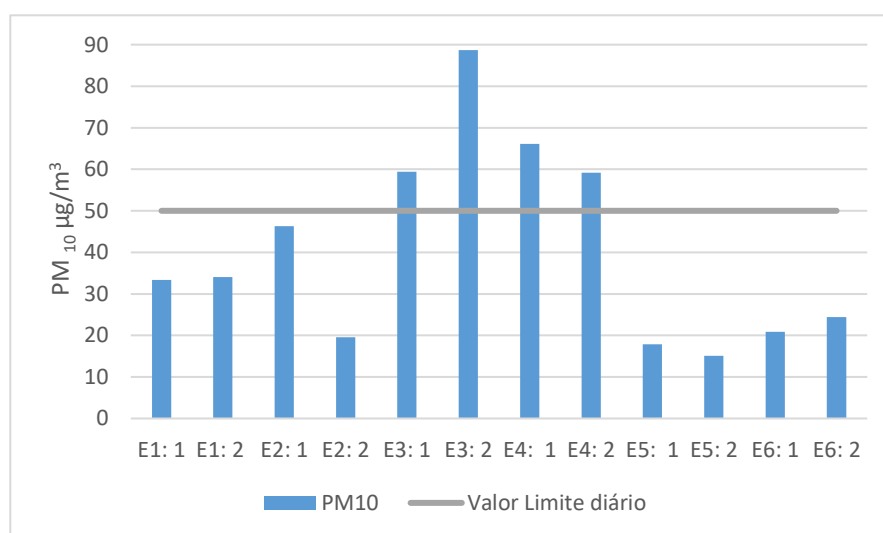
Neste estudo, encontramos outras causas possíveis para explicar alguns dos resultados encontrados, nomeadamente, i) o facto desta sala de aula ser num pavilhão de madeira temporário, com piso em linoleo, e ii) devido à idade do mesmo avançada, (onde se verificam fissuras entre o piso, ou os isolamentos), fazendo com que a limpeza se torne mais difícil e impedindo a sua remoção. Todo este processo leva à acumulação de PM.

Figura 27 — Série temporal [PM_{2.5}] sala E4:1

4.2.4. Matéria Particulada (PM₁₀)

Utilizando-se o limite estabelecido pela Portaria 353 para este parâmetro (50 µg/m³), podemos observar que o valor médio da concentração foi superior em 33% das amostras, nomeadamente nas Escolas 3 e 4. Este valor encontra-se exposto na Figura 28.

Figura 28 — Concentração média de PM₁₀.



Através da Figura 28 é possível também observar valores que ultrapassam os limites estabelecidos pela legislação em quatro salas analisadas. É interessante notar que os maiores valores médios de PM₁₀ foram encontrados nas mesmas escolas e salas em que se verificaram os valores superiores de PM_{2.5}.

As salas da Escola 3 apresentam elevadas taxas de ocupação, o que poderia eventualmente justificar, de alguma forma, os valores superiores. A Escola 4 possui taxas de ocupação consonantes com as das outras escolas, mas também apresenta valores elevados de PM₁₀, o que confirma os resultados de outras pesquisas, que revelam que os valores de PM são influenciados pela ocupação humana.

O intervalo da média dos resultados varia entre 15 µg/m³ na E2:1 e 89 µg/m³ na E4:1. No caso do PM₁₀, ao contrário do PM_{2.5}, 7 das 12 salas analisadas apresentam níveis abaixo da média. Assim como no PM_{2.5}, as salas que possuem maiores médias são a E3:2 e a E4:1 com valores de 89 e 66 µg/m³, respetivamente. A Tabela 19 apresenta estes valores.

Tabela 19 – Valores de Média, Máximo e Mínimo de PM₁₀ na escola para o período ocupado.

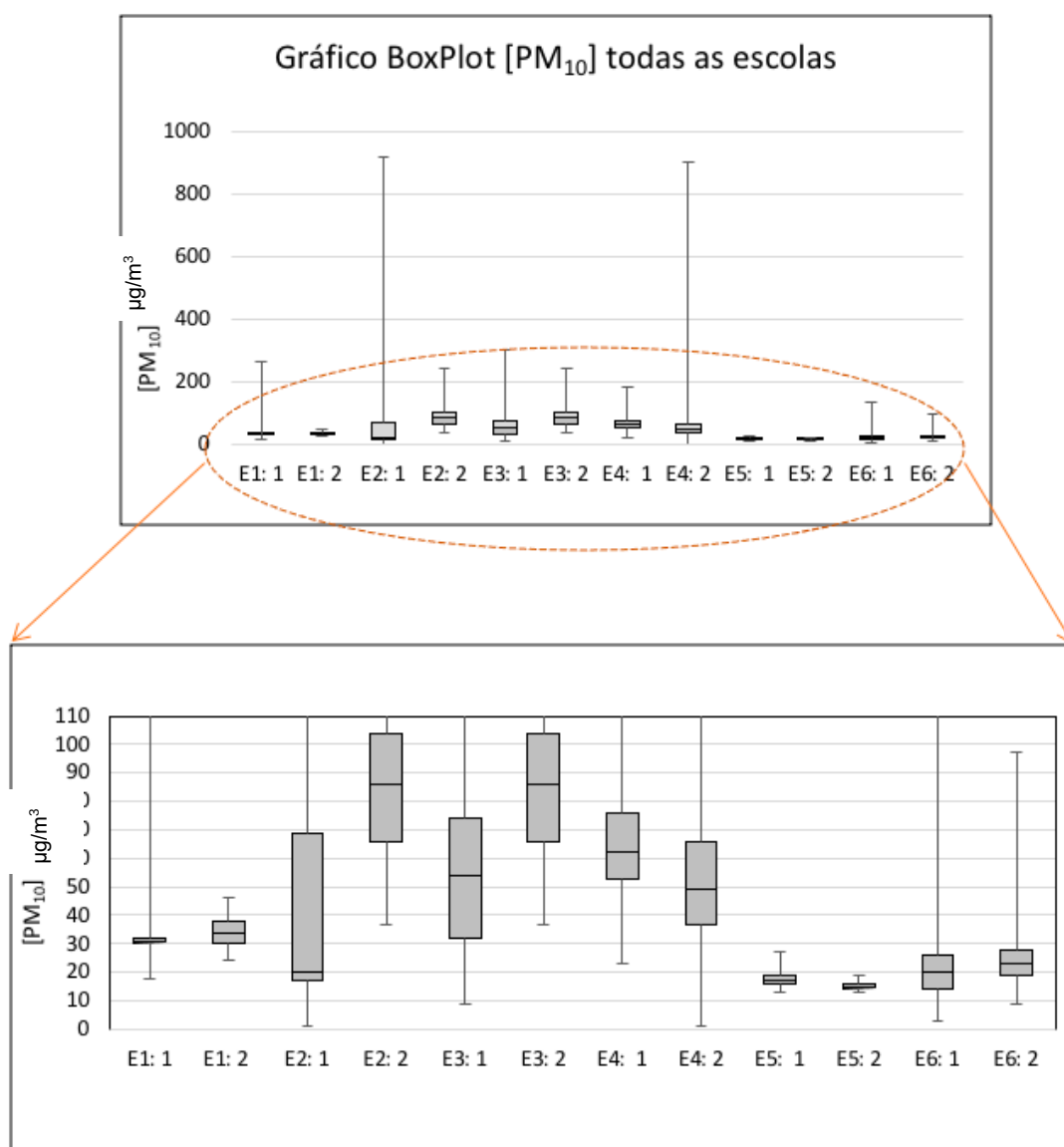
[PM ₁₀] µg/m ³	E1:1	E1:2	E2:1	E2:2	E3:1	E3:2	E4:1	E4:2	E5:1	E5:2	E6:1	E6:2
Média	33	34	46	20	59	89	66	59	18	15	21	24
Mínimo	18	24	13	37	9	37	23	1	13	13	3	9
Máximo	262	46	917	200	302	244	181	899	27	19	132	97

Por outro lado, podemos verificar que as concentrações de PM₁₀ aumentam assim que os estudantes entram na sala. Este facto pode justificar a concentração média semanal durante o período de ocupação muito acima da diretriz nacional (40 µg/m³).

Como já foi mencionado previamente, as fontes podem ter a sua origem no exterior, sendo trazidas pelos estudantes para dentro das salas, através de calçado e vestuário. Adicionalmente, temos a infiltração do exterior para o interior, através da ressuspensão de partículas que se alojam em janelas, portas e superfícies interiores. Estas partículas são remexidas durante a movimentação de entrada e saída dos estudantes ou até no processo de limpeza da sala.

A Figura 29 demonstra os valores mínimos, 1º quartil, mediana, 3º quartil e o valor máximo de todas as salas. Pode-se verificar que a sala 1 das Escolas 2 e 4 apresentam não só valores máximos maiores, como também um maior intervalo entre quartis.

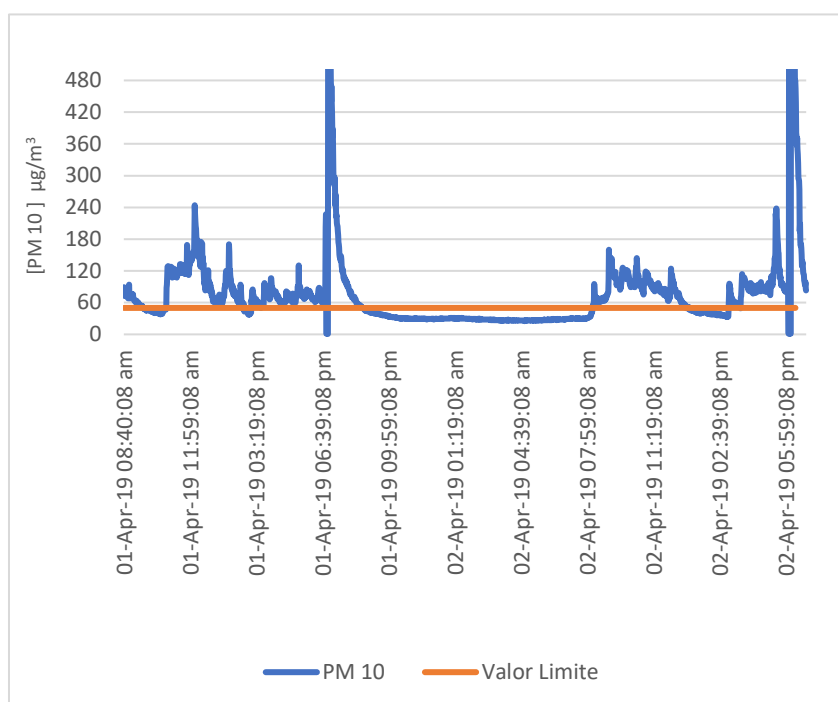
Figura 29 — Gráfico Box-plot com as concentrações mínimas, 1º quartil, mediana, 2º quartil e máximos de PM₁₀



No caso das escolas que apresentaram valores máximos superiores, tal como a Escola 2, vale sublinhar que se trata de uma escola básica, onde não há troca de estudantes, isto é, a mesma turma permanece na sala de aula durante o período escolar, ausentando-se apenas durante o período de almoço.

Para além disso, pode haver contribuições importantes causadas pelas atividades educacionais, como obras de arte plástica ou escrita num quadro negro.

Outra questão que merece destaque é que a Escola 3 (salas 1 e 2) e a Escola 4 (salas 1 e 2) apresentaram valores acima da legislação no que diz respeito tanto para o PM_{2.5} quanto para o PM₁₀.

Figura 30 — Série Temporal do PM₁₀ E3:2

A Figura 30 mostra as concentrações de PM₁₀ na sala E3:2, onde é possível de se observar um cenário preocupante, na qual temos teores acima do VL de 50 µg/m³ da Portaria 353-A/2013, de 4 de dezembro de 2013, durante quase todo o período analisado. Esta avaliação indica que a atividade humana pode ser um fator relevante para os níveis elevados de partículas no interior, e que estas podem ser influenciadas pela concentração de partículas do ambiente exterior ou pela ressuspensão de partículas com a entrada dos estudantes nas salas de aula.

São observados ainda sobressaltos que superam, em mais de 10 vezes, o limite sugerido na Legislação, sempre em horários semelhantes: no final da tarde, próximos às 18h e 19h, em dois dias distintos. Este facto sugere a existência de ressuspensão de material particulado e momentos de aberturas de janelas.

Do mesmo modo, os mesmos resultados podem ser descritos nas Figuras 31 e 32, as quais apresentam os resultados da E2:2 e E3:1 com vários picos de valores anómalos ao longo do dia, correspondentes aos períodos de limpeza das salas, como já foi abordado, no subcapítulo anterior .

Figura 31— Série Temporal do PM₁₀ E2:2

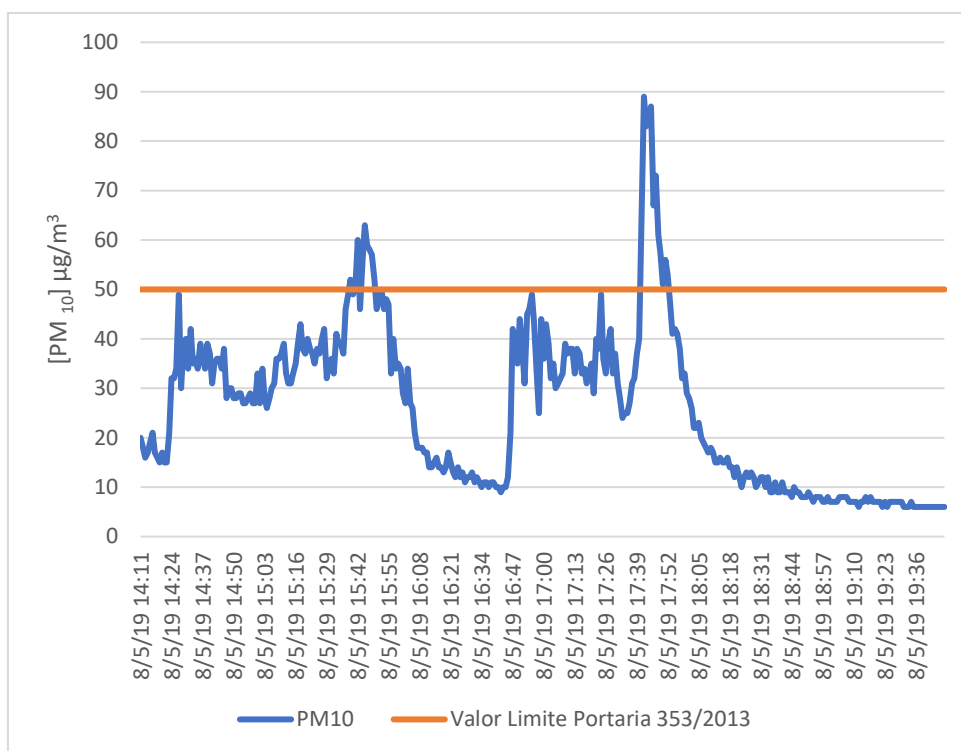
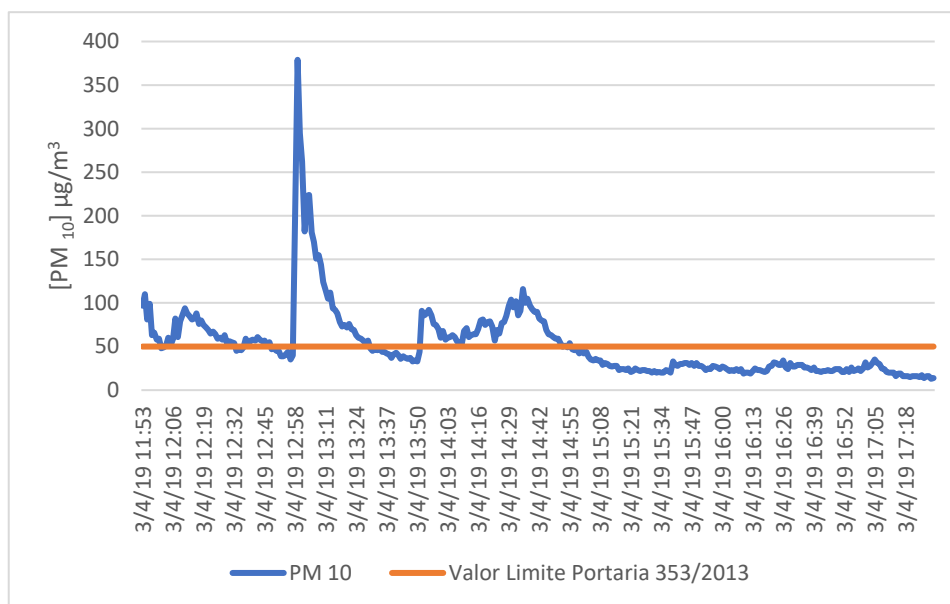
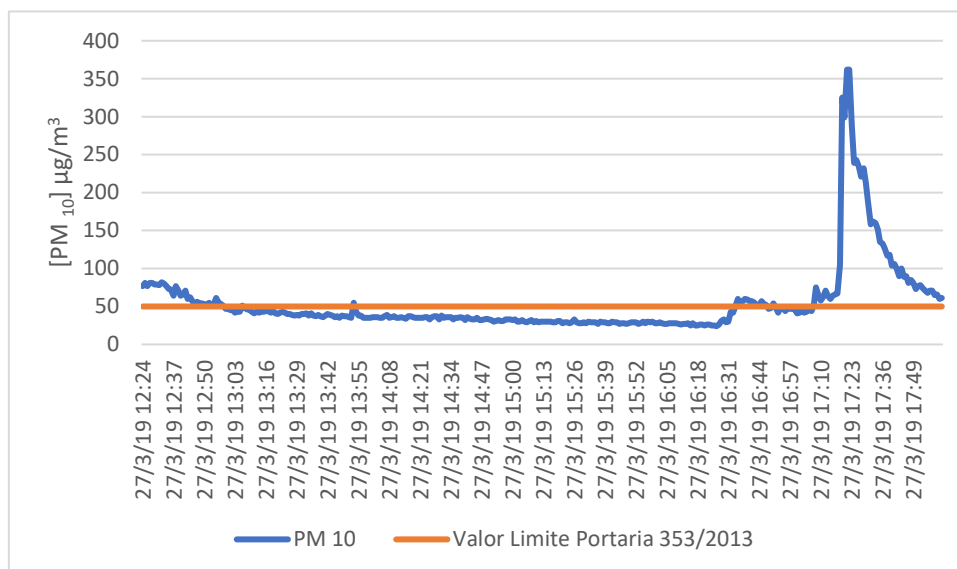


Figura 32 — Série Temporal PM₁₀ E3:1



A Figura 33 apresenta os resultados da sala E4:1, que indicam que os estudantes estão expostos a níveis acima ao permitido na Portaria 353-A/2013, de 4 de dezembro de 2013, durante grande parte do tempo das aulas. Por sua vez, isto pode indicar que houve influência dos poluentes do exterior para o ar interior, provocando uma qualidade de ar interior insatisfatória.

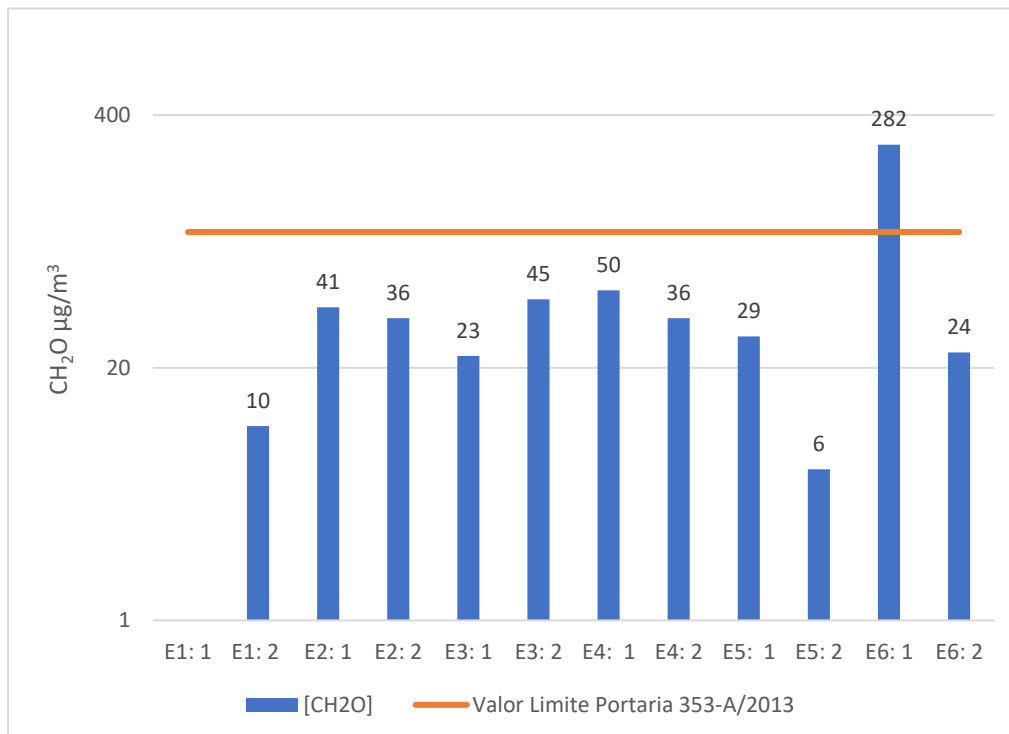
Figura 33 — Série Temporal [PM₁₀] na sala E4:1



4.2.5. Formaldeído

Os resultados relativos às concentrações médias de CH₂O em todas as escolas e salas encontram-se representados na Figura 34 em µg/m³.

Figura 34 — [CH₂O] média



As concentrações médias de CH₂O em quase todas as escolas não ultrapassaram 100 µg/m³, exceto a E6:1. O Valor Limite da Legislação Portuguesa, da Portaria 353-A/2013,

de 4 de dezembro, de 2013, possui valores consideravelmente altos ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) em relação a outras diretrizes e não possuem uma perspectiva de acordo com efeitos na saúde. No entanto, o valor guia de QAI do Conselho Francês para auditorias no âmbito da QAI, considera aspetos relacionados à saúde, sendo o seu valor limite considerado igual $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A partir deste contexto, se adotarmos o valor guia português, teremos apenas uma escola acima do parâmetro. Por outro lado, considerando como base o valor francês, temos um cenário preocupante no qual apenas quatro salas não se encontram acima dos limites. Constatam-se concentrações acima do limite de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em seis salas de aula na Escola 2 (sala 2), na Escola 3 (sala 2), na Escola 4 (ambas as salas), na Escola 5 (ambas as salas) e na Escola 6 (sala 1). Apenas a Escola 1 tem valores abaixo do limite da Portaria 353-A/2013, de 4 de dezembro de 2013.

A E6:1 apresenta um valor de $282 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que é quase 3 vezes superior ao valor Limite segundo a referida Portaria, de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. É importante ressaltar que esta é a única escola de ensino superior que apresenta ventilação mecânica. Apesar de apresentar registos de aberturas de janelas e portas, a contribuição humana (perfumes, cremes, etc) pode explicar este valor tão elevado, uma vez que, na sala 2, que conta com uma taxa de ocupação bem menor, os valores estão abaixo do limite. Este facto corrobora os achados de Blondeau et al. (2005) que revela que a utilização de cosméticos dos próprios alunos e professores podem contribuir para o aumento de emissão deste poluente no ambiente interior, bem como a própria influência de fumo do tabaco que pode ser emitido.

Os resultados médios obtidos, na sua maioria, encontram-se acima do valor limite da diretriz francesa, que considera os efeitos na saúde. Em relação à legislação Portuguesa, apenas a sala E6:2 apresentam níveis superiores aos permitidos.

Verifica-se ainda que, apesar de não ser a principal fonte, a presença humana contribuiu para o aumento nas concentrações de formaldeído. O mobiliário pode, também, atuar como fator contributivo através das emissões por tintas e vernizes utilizados nas pinturas destes conterem teores significativos de CH_2O .

A Tabela 20 resume os resultados dos valores médios, mínimos e máximos. Através da tabela podemos observar que todos os valores que se encontraram acima do valor limite estão destacados a negrito.

Tabela 20 – Valores médio, mínimos e máximos de concentração de CH₂O

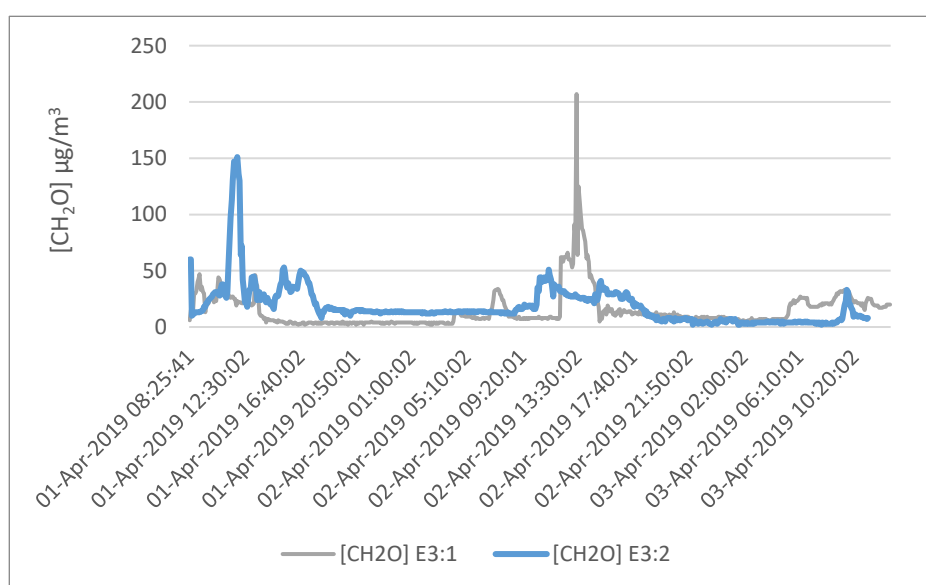
[CH ₂ O] μg/m ³	E1:1	E1:2	E2:1	E2:2	E3:1	E3:2	E4:1	E4:2	E5:1	E5:2	E6:1	E6:2
Média	-	19	41	36	36	50	45	23	29	6	24	282
Mínimo	-	6	7	-	7	17	-	4	1	1	9	-
Máximo	-	34	76	91	207	147	101	100	108	7	73	921

Observa-se ainda, que a E3:2 e a E4:1 apresentam valores de CH₂O acima da legislação. Estas salas demonstraram concentrações superiores para vários outros quesitos, nomeadamente o CO₂, PM_{2.5} e PM₁₀, o que justifica a necessidade de um estudo mais detalhado destes espaços. Para além disso, vale ressaltar que a E3:2 é uma das quais possui maior taxa de ocupação.

Também a sala E6:2 apresenta valores muito acima do valor limite, perfazendo o valor médio de 229 μg/m³ e chegando a medir 921 μg/m³ de valor máximo, sendo a única escola com sistema de ventilação mecânica.

A Figura 35 abaixo demonstra os resultados da Escola 3 para ambas as salas. Através desta, é possível verificar que, na sala 1, o seu maior pico registado ocorre às 9h e às 13h, correspondendo ao período ocupado durante as aulas, sendo que o contributo para tal devem-se aos ocupantes.

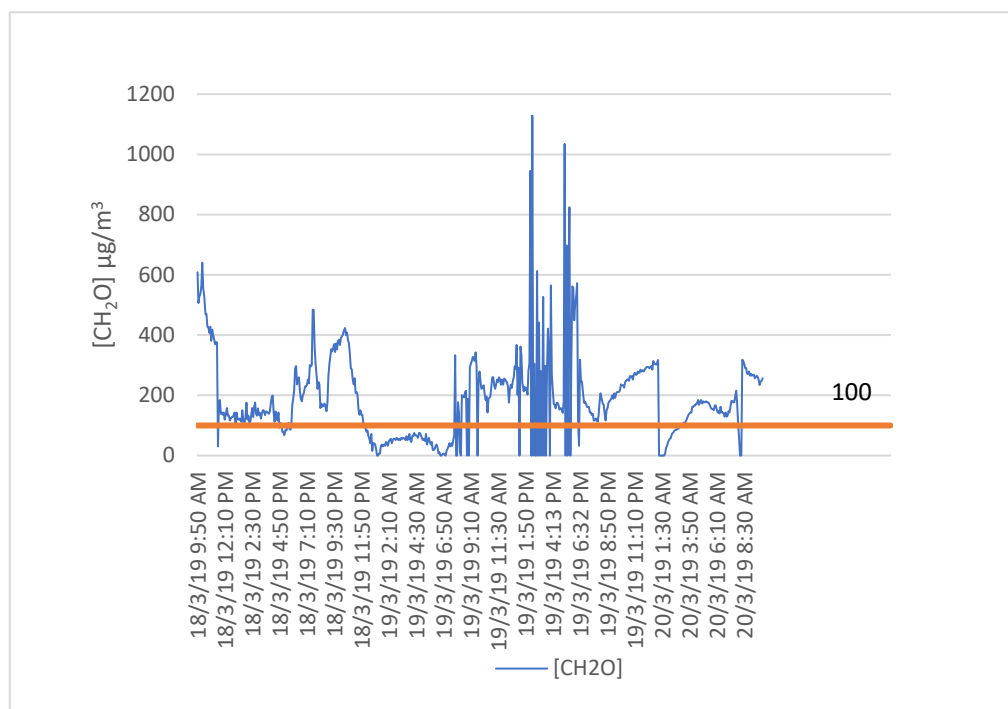
Algo semelhante ocorre na sala 2, onde o pico é atingido entre as 11h e as 13h. Observamos, igualmente, uma queda no mesmo momento, que de acordo com os registos nas aulas acabaram às 17h.

Figura 35 — Série temporal [CH₂O] E3:1 e E3:2

Conforme apresentado, os níveis de exposição nas salas de aula estão extremamente elevados, muitas vezes excedendo o limite de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sendo ultrapassado em quase sete vezes na sala 1 e em três vezes na sala 2. Esta ocorrência deve-se, muito provavelmente, à evaporação de formalina presentes nos produtos de beleza utilizados pelos estudantes e professores.

Na Figura 36 é possível verificar que os resultados para a E6:2 apresentam valores muito acima da média. No entanto, devemos ter em consideração que, por se tratar de uma universidade, os estudantes a cada 1h30, no máximo, trocam de sala. Através dos registos é possível verificar que:

- Foram identificados três grandes picos, fora dos quais, na sua grande maioria, os resultados apresentam-se acima da média de outras escolas e num valor bastante superior ao Valor Limite.
- Na parte da manhã existiram aulas com menos de 20 alunos, e janelas abertas;
- Durante o segundo pico e perto do início das aulas, após o almoço, 38 estudantes estiveram presentes com as janelas fechadas, chegando a registar-se o valor de $1129 \mu\text{g}/\text{m}^3$;
- Entre o segundo e o terceiro pico houve uma aula com menos de 30 estudantes e janelas abertas, o que facilitou a descida dos formaldeídos;
- O terceiro pico ocorreu no momento de início de uma aula com 52 ocupantes e apenas os professores tinham registado a abertura das janelas e portas. Os resultados apontam que tal foi insuficiente para garantir uma boa qualidade do ar no interior da mesma sala.

Figura 36 — Série temporal [CH₂O] E6:2

4.2.6. Amostradores Passivos: COV e Aldeídos

Os resultados desta campanha de amostragem podem ser observados nas Tabelas 21 e 22. Verifica-se que os resultados são bastante bons e não há nenhuma excedência a apontar, especialmente depois de vários outros poluentes terem excedido os valores limites.

Nomeadamente, todas as concentrações de benzeno estão abaixo de 1 µg/m³, sendo um resultado admirável, principalmente se considerarmos que esta substância foi apontada em vários estudos como tendo um efeito cancerígeno.

Os valores obtidos estão abaixo dos resultados de Madureira et al. (2016), este estudo contando com resultados de 17 µg/m³ para o formaldeído, e também valores abaixo para o acetaldeído, que demonstrou valores de 7,95 µg/m³. Os resultados para acetaldeído foram, portanto, inferiores, entre 1,40 – 4,70 µg/m³.

Dentro de todos os aldeídos, foram observados níveis mais baixos para Acroleína, com valores de 0,05 µg/m³, bem inferiores ao valor limite da Diretriz Francesa, com valores de 0,8 µg/m³. Verificou-se, em seguida, que os valores para o Butanal também estavam similares a 0,10 µg/m³.

Os resultados do benzeno, o-xileno, etilbenzeno, tetracloretileno, estireno, alfa-pineno, isopentanal e benzaldeído mantiveram-se abaixo de 1,0 µg/m³.

Tabela 13 — Resultados Amostradores Passivos escolas 1- 3

Poluente	$\mu\text{g}/\text{m}^3$					
	E1: 1	E1: 2	E2: 1	E2: 2	E3: 1	E3: 2
Formaldeído	5,2	4,20	5,60	7,00	4,40	4,50
Acetaldeído	2,90	2,70	4,10	4,70	2,40	2,50
Acroleína	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Benzeno	0,74	0,61	0,69	0,55	0,64	0,59
Tolueno	1,60	4,40	1,80	2,70	1,40	3,10
m + p-xileno	1,50	3,60	1,80	2,60	1,80	1,80
o-Xileno	0,58	1,10	0,66	0,86	0,75	0,52
Etilbenzeno	0,48	1,20	0,58	0,90	0,52	0,62
Tricloroetileno	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Tetracloroetileno	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,22
Estireno	0,32	0,29	0,41	0,20	0,18	0,20
1,4-diclorobenzeno	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Alfa-pineno	0,58	0,66	0,68	1,40	0,29	0,29
Propanal	1,40	1,30	1,40	1,40	1,10	1,10
Butanal	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Pentanal	1,10	1,00	1,40	1,50	0,60	0,70
Isopentanal	0,60	0,50	1,00	1,30	0,70	0,80
Hexanal	6,80	6,70	11,80	12,10	4,60	4,30
benzaldeído	0,20	0,20	0,40	0,40	0,20	0,20

As concentrações internas de formaldeído podem estar relacionadas com os materiais isolantes, como são o caso de móveis para mesas, muitas vezes de aglomerado ou contraplacado, contendo resinas à base de formaldeído e tintas. Produtos de consumo e de limpeza, utilizados tanto no trabalho didático como nos processos de limpeza das salas de aula, podem influenciar os resultados.

Tabela 2214 — Resultados Amostradores Passivos escola 4 – 6.

Poluente	$\mu\text{g}/\text{m}^3$					
	E4: 1	E4: 2	E5: 1	E5: 2	E6: 1	E6: 2
Formaldeído	6,40	7,50	9,80	6,80	6,00	8,80
Acetaldeído	2,70	1,40	2,40	1,70	3,80	3,40
Acroleína	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Benzeno	0,88	0,57	0,52	0,00	0,61	0,76
Tolueno	2,00	0,96	1,36	0,48	0,81	1,90
m + p-xileno	2,80	1,60	1,30	0,43	0,99	2,20
o-xileno	0,99	0,60	0,32	0,12	0,40	0,79
Etilbenzeno	0,92	0,50	0,43	0,24	0,31	0,68
Tricloroetileno	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Tetracloroetileno	0,15	0,12	0,05	0,05	0,07	0,17
Estireno	0,53	0,20	0,28	0,16	0,14	0,39
1,4-diclorobenzeno	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Alfa-pineno	0,29	0,57	0,57	0,19	0,29	0,29
Propanal	1,20	0,80	1,20	0,90	1,80	1,70
Butanal	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Pentanal	0,80	0,50	0,90	0,60	1,20	1,10
Isopentanal	1,00	0,50	0,50	0,40	1,00	1,10
Hexanal	5,70	3,50	6,30	3,80	5,20	5,10
benzaldeído	0,30	0,10	0,38	0,22	0,40	0,40

No entanto, os resultados da Tabela 15 e 16 para os amostradores passivos apresentam-se, no geral, inferiores ao VL da Portaria 353-A/2013, de 4 de dezembro de 2013. Além disso, tendo em consideração que a maioria das salas eram salas de aula comuns, as origens mais plausíveis para os compostos encontrados seriam produtos de higiene pessoal e produtos de limpeza (Madureira et al., 2016).

4.3. Ventilação

Como não foi possível medir os valores de CO₂ fora das salas de aula, o cálculo da taxa de ventilação foi inexecutável. Por isso, neste trabalho, foi efetuado o cálculo da percentagem de CO₂ entre 1000 ppm e inferior a 1700 ppm, bem como a % CO₂ acima de 1700 ppm (Canha et al., 2016).

O valor foi calculado a partir do índice ÍCONE (Índice de confinamento do ar em escolas) desenvolvido em 2011 por Ribéron et al. (2011) como uma ferramenta de comunicação para os ocupantes. O índice avalia a saturação da sala com base na percepção da qualidade do ar resultante das emissões de bioefluentes durante o período ocupado. Neste índice f_1 e f_2 , as percentagens de concentrações de CO₂ são classificadas abaixo de 1000 ppm e entre 1000 e 1700 ppm, respetivamente, durante o período de ocupação definido por:

$$ICONE = \frac{2,5}{\log_{10}(2)} \log_{10}(1 + f_1 + 3 f_2)$$

De acordo com Canha et al. (2016), o índice tem uma escala que varia de 0 a 5, sendo que o 5 representa o nível mais alto de saturação do ar. O índice de confinamento de ar ÍCONE é então calculado aplicando a fórmula, onde f_1 é a proporção dos valores de CO₂ entre 1000 e 1700 ppm ($f_1 = n_2 / (n_0 + n_1 + n_2)$), e f_2 é a proporção dos valores de CO₂ acima de 1700 ppm ($f_2 = n_3 / (n_0 + n_1 + n_2)$)” (p. 353). A Tabela 23 contém os resultados para cada sala da percentagem de CO₂ e o resultado, de acordo com o índice ÍCONE.

Tabela 23 — Percentagem de concentrações de CO₂ entre 1000 e 1700 ppm e % de CO₂ acima de 1700 ppm, durante o período de ocupação

% CO ₂	E1:1	E1:2	E2:1	E2:2	E3:1	E3:2	E4:1	E4:2	E5:1	E5:2	E6:1	E6:2
<1000 ppm	61	51	22	57	23	8	22	100	71	52	12	56
>=1000;<1700 ppm	39	49	36	40	55	60	70	0	21	48	84	36
> 1700 ppm	0,1	0	41	6	22	33	8	0	0,26	0,28	4	8
ÍCONE	1	1	3	2	3	3	2	0	1	1	2	2

Os resultados permitem identificar uma relação direta entre o poluente e o número de ocupantes, principalmente quando não ocorre renovação de ar. Neste caso, nenhuma sala obteve a classificação 4 ou 5, e a sala E4:2 obteve a melhor classificação (0), indicando que o ar se encontrou sempre abaixo de 1000 ppm.

Devemos salientar ainda que a E2:1 possui 41% [CO₂] acima de 1700 ppm na C₂, valor este que ultrapassa os valores limites, de acordo com a Legislação Portuguesa, equiparando-se à sala E3:2 que possui 33%. Em média, os resultados das outras salas variaram entre <8% acima de 1700 ppm para a sala E2:2, E6:2 e 22% na sala E3:1. A sala E6:1 teve resultados de 4%, as restantes 0%.

Constata-se, ainda, o CO₂ variou com concentrações médias acima do valor limite, alcançando valores entre 1942 ppm e 5320 ppm no interior das salas de aula, colocando em risco a saúde dos estudantes. Outros estudos apresentam resultados similares, tais como os de Vassella et al. (2021) cujos resultados que variam entre 401- 4853 ppm.

4.4. Análise comparativa

A partir dos resultados obtidos em ambas as campanhas de amostragem, será feita uma análise comparativa entre as mesmas, nomeadamente, entre a primeira campanha de amostragem efetuada no ano letivo de 2017/2018 (designada por C₁), e a segunda campanha realizada no ano letivo 2018/2019 (designada por C₂). É importante salientar que as duas campanhas ocorreram nas mesmas escolas e respetivas salas de aula.

Na Figura 37 estão apresentados os resultados para o PM_{2.5}. De referir que, em C₁, não foi possível recolher os dados para a E1:1, portanto não houve comparação possível.

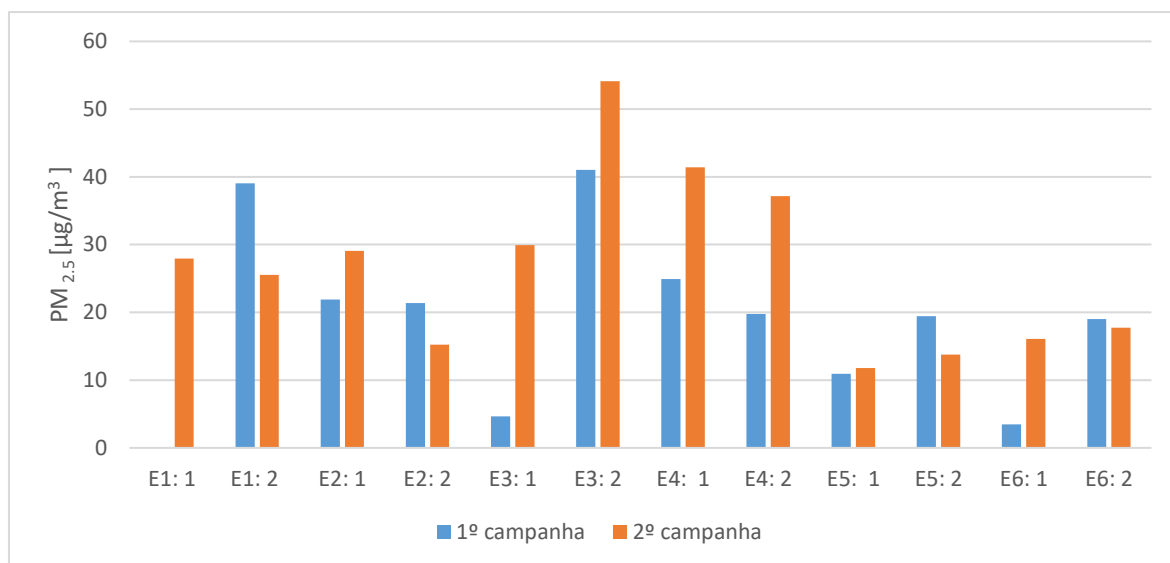


Figura 37 — Gráfico comparação resultados $[PM_{2.5}]$ da C_1 e C_2 .

Verifica-se que nas salas E1:2, E2:2, E5:2 e E6:2 ocorreram decréscimos significativos no valor médio da concentração do $PM_{2.5}$, valores que oscilaram de 36% a 27%. Na E1:2 a queda foi de 36% (de $39 \mu g/m^3$ para $25 \mu g/m^3$), na E2:2 a queda foi de 29% (de $21,4 \mu g/m^3$ para $15,2 \mu g/m^3$) e na E5:2 houve uma queda de 27% (de $19 \mu g/m^3$ para $13,8 \mu g/m^3$). Somente na E6:2 é que tivemos uma redução menor, na ordem de 7% (de $19 \mu g/m^3$ para $17,7 \mu g/m^3$).

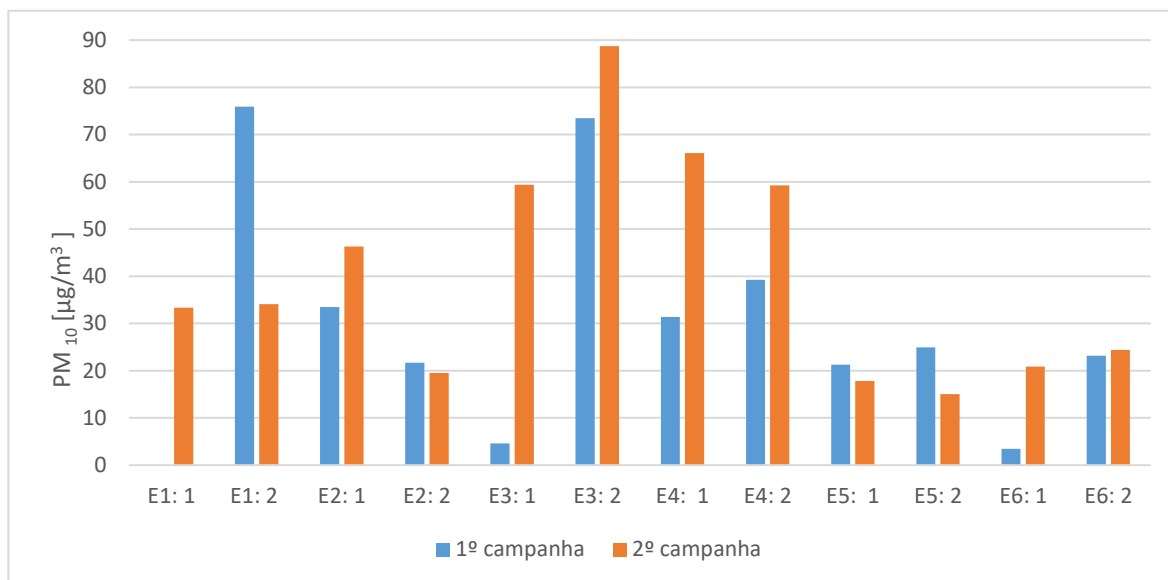
Entretanto, as restantes salas apresentaram valores superiores em relação à primeira campanha (C_1). Em particular, de salientar os aumentos ocorridos na E3:1, que passou de $4,63 \mu g/m^3$ para $29,93 \mu g/m^3$, representando um aumento de 546%. Adicionalmente, na mesma escola, a média do $PM_{2.5}$ foi de $54,13 \mu g/m^3$, mais do que o dobro do VL. Tal facto semelhante aconteceu com a Escola 4, em que ambas as salas apresentaram valores acima do permitido por lei, com o valor médio bem acima da primeira campanha (C_1).

As salas 1 da Escola 2 e da Escola 3 apresentaram, de forma semelhante, aumentos na concentração e excedências que estão acima do permitido. De referir ainda que a Escola 3 foi aquela que apresentou uma maior diferença, com uma subida de concentração de $<5 \mu g/m^3$ para $29,93 \mu g/m^3$. Igualmente observado na E6:1 temos um aumento de $3,48 \mu g/m^3$ para $16 \mu g/m^3$, mas que permaneceu dentro do VL considerado.

Os resultados relativos ao PM_{10} estão apresentados na Figura 38 e tiveram um comportamento muito semelhante ao do $PM_{2.5}$. Foi verificado um elevado valor da concentração em 5 das 12 salas, das quais 4 apresentaram valores acima do limite preconizado na Portaria 353-A/2013, de 4 de dezembro de 2013, chegando a valores de $88 \mu g/m^3$ na E3:2 e na ordem de $66 \mu g/m^3$ para a sala 1 da Escola 4, que no ano de 2017 tinha o valor de $31,38 \mu g/m^3$, significando um aumento de 110%. Ainda na E3:1 ocorreu um aumento

de $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$, resultados similares ao da E4:2, que também teve o valor médio de $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

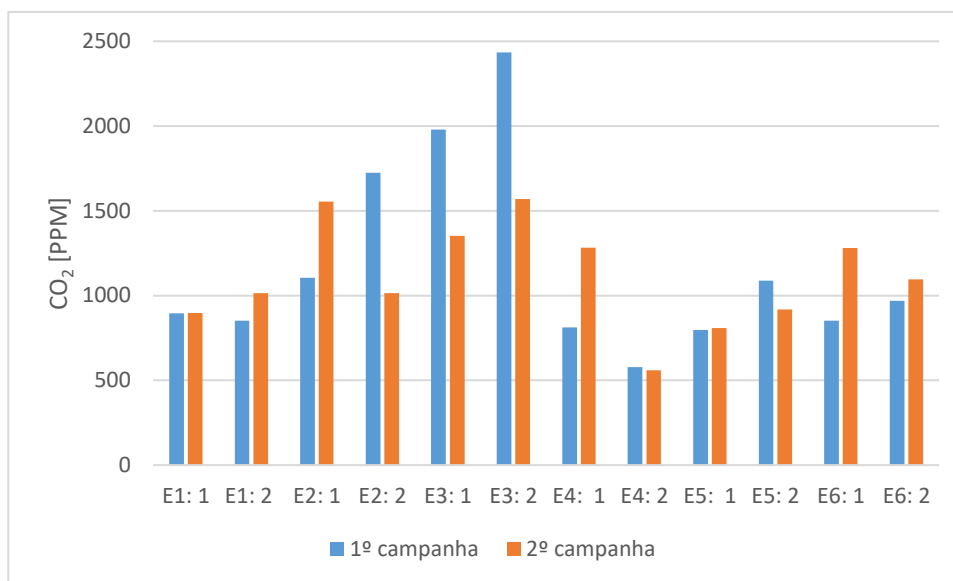
Figura 38 — Gráfica comparação resultados $[\text{PM}_{10}]$ da C1 e C2



As demais salas (E2:2, E5:1, E5:2, E6:1 e E6:1) apresentaram resultados abaixo do valor limite. Resta salientar o facto de que a sala 1 da Escola 6 foi a que apresentou resultados médios de $20,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sendo que na primeira campanha (C_1) contava com valores na ordem dos $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Em relação ao dióxido de carbono e observando os resultados apresentados na Figura 39, é possível verificar que os valores médios de 5 salas (E2:2; E3:1; E3:2; E4:1 e E6:1) não cumpriram com os valores recomendados em relação à segunda campanha (C_2). É possível ressaltar que as Escolas 2 e 3, ambas na sala 2, tiveram uma melhoria relativa aos valores da primeira campanha (C_1), com uma redução de $2400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $1569 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mas que, mesmo assim, continua acima do valor aconselhado para a saúde humana.

Do mesmo modo que a E2:2 e a E3:1 apresentaram queda nos teores, com valores de $1700 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $1900 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respetivamente, durante a primeira campanha (C_1) e a segunda campanha (C_2), os resultados foram de $1014 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $1350 \mu\text{g}/\text{m}^3$. As Escolas 1 e 5 não apresentaram resultados discrepantes, mantendo-se numa média de valores inferior a $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 39 — Gráfico evolução comparativa [CO₂] das 1ª e 2ª campanhas

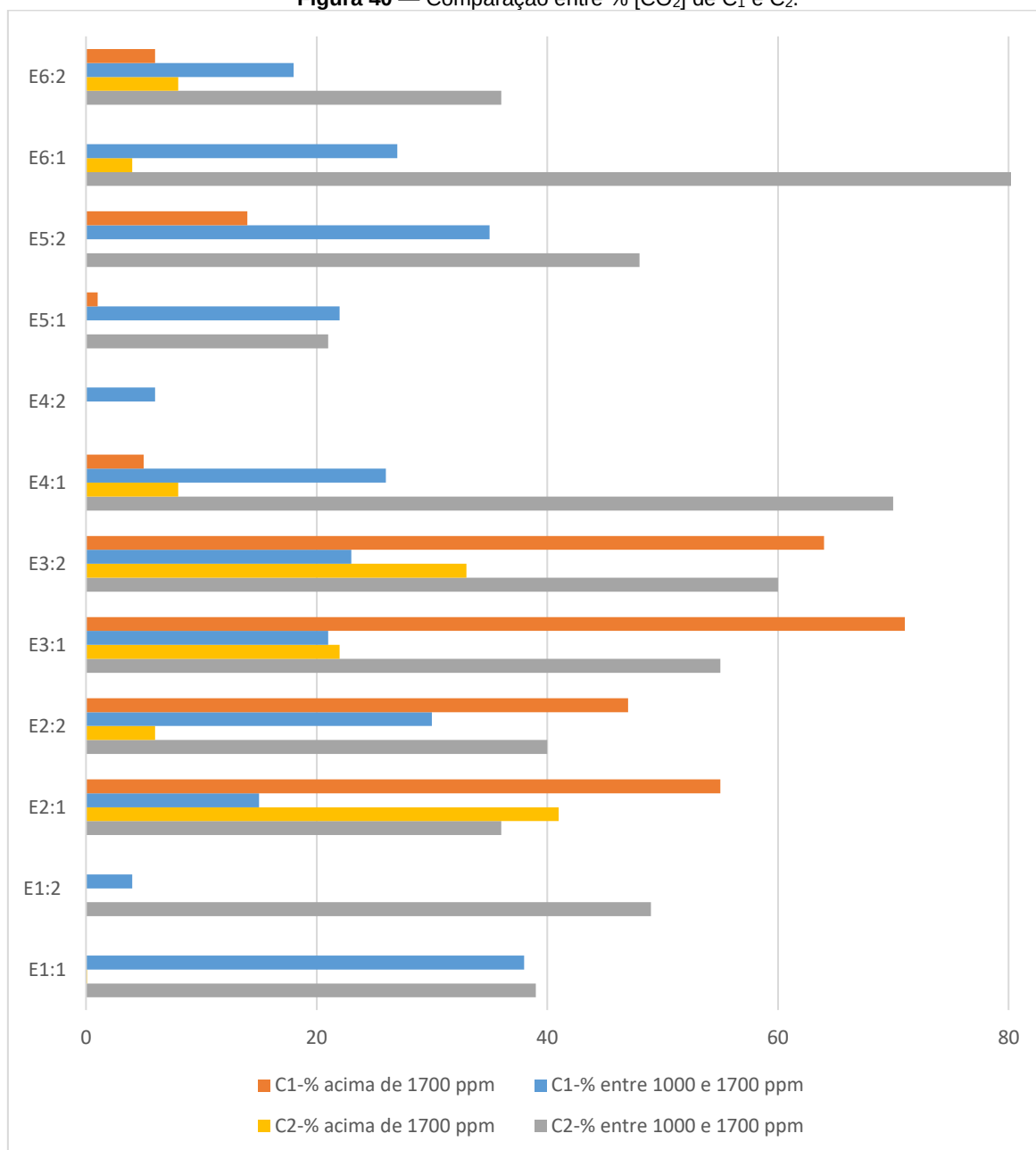
Embora as recomendações tenham destacado a relevância da renovação do ar, é evidente que os esforços das escolas não foram suficientes para reduzir significativamente as concentrações de CO₂ no interior.

No gráfico da Figura 40 é possível visualizar as % [CO₂] entre 1000 e 1700 ppm, e % [CO₂] acima de 1700 ppm da campanha realizada no ano letivo de 2017/2018 (C₁) e da campanha realizada no ano letivo 2018/2019 (C₂). Podemos afirmar que E6:1 e E4:1 apresentaram resultados de 70% e 84%, entre 1000 – 1700 ppm, respetivamente, sendo as salas com maiores percentuais com valores acima de várias diretrizes, tais como a francesa.

Devemos salientar, ainda, que a E2:2 possuía um valor de 46% [CO₂] acima de 1700 ppm na C₁, valor este que decresceu para 6% na C₂, equiparando-se à sala E3:1 e E3:2 que possuem ambas um decréscimo de 70% e 64% na C₁ para 22% e 33% durante a C₂.

Em média, os resultados das outras salas aumentaram em relação a C₁ para a percentagem de CO₂ entre 1000-1700 ppm nas salas E1:2, E2:1, E2:2, E4:1. A sala E6:1, e E6:2 apresentaram resultados superiores aos referentes a C₁, passando de 26% para 84% na sala E6:1 e de 17% para 36% na sala E6:2. Na C₂, a sala E4:2 apresentou resultados 100% abaixo de 1000 ppm.

Figura 40 — Comparação entre % [CO₂] de C₁ e C₂.



Relativamente ao monóxido de carbono não se verificaram variações consideradas relevantes. As concentrações deste poluente mantiveram-se baixa em ambas as campanhas.

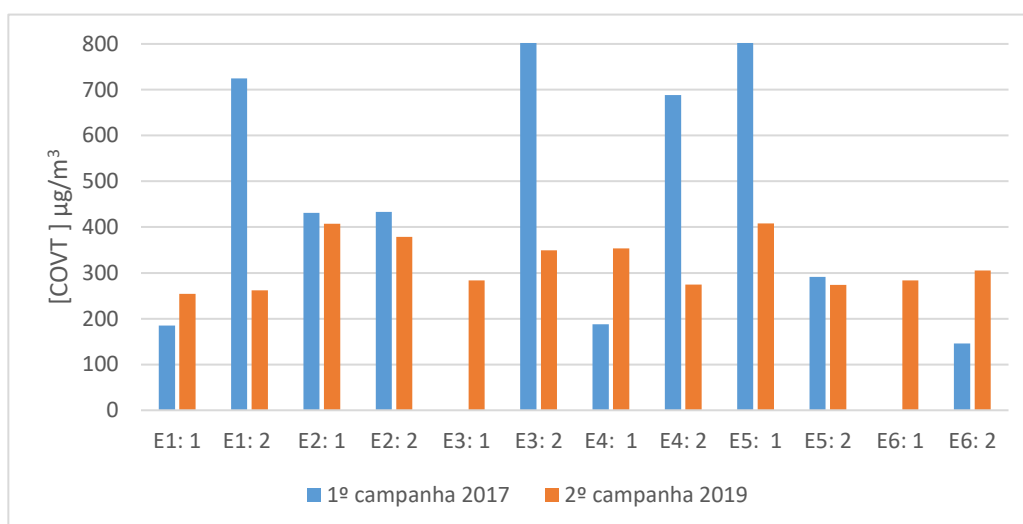
A Tabela 24 apresenta os resultados para o COVT que foi medido em contínuo, bem como a diferença entre os valores obtidos entre a primeira campanha (C_1) e a segunda campanha (C_2). Constata-se que 7 das 12 salas tiveram um resultado médio de concentração inferior ao da C_1 e 3 salas, nomeadamente, E1:1, E4:1 e E6:2 tiveram valores superiores de 38%, 88% e 109% acima, respetivamente.

Tabela 15 — Percentagem de diferença da análise evolutiva COVT.

[COVT] $\mu\text{g}/\text{m}^3$	E1:1	E1:2	E2:1	E2:2	E3:1	E3:2	E4:1	E4:2	E5:1	E5:2	E6:1	E6:2
I	185	725	431	433	-	807	188	688	817	291	-	146
II	254	262	407	379	284	349	354	275	408	274	283	305
% diferença	38	-64	-5	-13	-	-57	88	-60	-50	-6	-	109

Na Figura 41 encontram-se descritos os valores médios obtidos para COVT. Pode-se notar que houve uma queda destes valores em quase todas as salas, assim como em diversos estudos revistos ao longo deste trabalho. Devemos destacar que as salas E:1, E4:1, E:2 tiveram aumentos de $185 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $254 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 188 para $354 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $146 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $305 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respetivamente.

Figura 41 — Gráfico comparação [COVT] para C_1 e C_2



Em linhas gerais, podemos concluir que houve uma melhoria significativa na qualidade do ar das salas em relação ao poluente COVT, tanto que em 2019, em C_2 não foram verificadas salas com excedências ao VL em relação aos valores médios.

Na Tabela 25 encontram-se os resultados de aldeídos obtidos durante a amostragem passiva, para ambas as campanhas, juntamente com a diferença percentual observada. Pode-se constatar que houve um declínio dos valores entre C_1 e C_2 .

No que diz respeito aos aldeídos, a Escola 2 foi aquela que apresentou maior percentual de aumento nas concentrações, com valores entre 2% e 50%. Neste sentido, o isopentanal demonstrou resultados 200% acima do valor da primeira campanha realizada no ano letivo de 2017/2018.

Para além disso, a Escola 6 também apresentou resultados elevados para este aldeído, com percentuais aproximados de 60% e 400%, uma vez que, o valor medido na primeira campanha (C_1) foi de $0,21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e tivemos um aumento para $1,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na segunda campanha em 2019 (C_2), embora não exista um VL para este poluente.

Tabela 25 — Tabela de [Aldeídos] com valores comparativos da 1º e 2º campanha.I - Primeira campanha (C₁), ano letivo 2017/2018; II- Resultados da campanha C₂, ano letivo 2018/2019 e % de diferença dos resultados

Aldeídos													
µg/m³		E1:1	E1:2	E2:1	E2:2	E3:1	E3:2	E4:1	E4:2	E5:1	E5:2	E6:1	E6:2
Formaldeído	C1	10,18	9,53	5,71	4,16	7,55	7,93	9,2	11,52	11,22	6,49	7,6	11,96
	C2	5,2 (▼-49%)	4,2 (▼-56%)	5,6 (▼-2%)	7 (▲68%)	4,4 (▼-42%)	4,5 (▼-43%)	6,4 (▼-30%)	7,5 (▼-35%)	9,8 (▼-13%)	6,8 (▲5%)	6 (▼-21%)	8,8 (▼-26%)
Acetaldeído	C1	4,34	4,47	4	3,11	5,52	4,1	3,28	2,13	4,11	3,18	5,06	4,53
	C2	2,9 (▼-33%)	2,7 (▼-40%)	4,1 (▲ 2%)	4,7 ▲ 51%	2,4 (▼-57%)	2,5 (▼-40%)	2,7 (▼-18%)	1,4 (▼-34%)	2,4 (▼-42%)	1,7 (▼-47%)	3,8 (▼-25%)	3,4 (▼-40%)
Acroleína	C1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	C2	0,05 (▼-75%)	0,05 (▼-75%)	0,05 (▼-50%)	0,05 (▼-50%)	0,05 (▼-50%)	0,05 (▼-50%)	0,05 (▼-50%)	0,05 (▼-50%)	0,05 (▼-50%)	0,05 (▼-50%)	0,05 (▼-50%)	0,05 (▼-50%)
Propanal	C1	4,6	4,53	1,18	0,9	1,13	1,52	3,47	3,79	4,87	2,91	2,78	2,36
	C2	1,4 (▼-70%)	1,3 (▼-71%)	1,4 (▲ -17%)	1,4 (▲ 56%)	1,1 (▼-3%)	1,1 (▼-28%)	1,2 (▼-65%)	0,8 (▼-79%)	1,2 (▼-75%)	0,9 (▼-69%)	1,8 (▼-35%)	1,7 (▼-28%)
Butanal	C1	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	C2	0,1 (▼ -86%)	0,1 (▼ -86%)	0,1 (▼ -83%)	0,1 (▼ -83%)	0,1 (▼ -83%)	0,1 (▼ -83%)	0,1 (▼ -83%)	0,1 (▼ -83%)	0,1 (▼ -83%)	0,1 (▼ -83%)	0,1 (▼ -83%)	0,1 (▼ -83%)
Pentanal	C1	1,82	1,67	1,26	0,91	1,17	0,9	1,25	1,23	1,24	1,14	1,55	1,5
	C2	1,1 (▼ -40%)	1 (▼ -40%)	1,4 (▲ 11%)	1,5 (▲ 65%)	0,6 (▲ 11%)	0,7 (▼ -22%)	0,8 (▼ -36%)	0,5 (▼ -59%)	0,9 (▼ -27%)	0,6 (▼ -47%)	1,2 (▼ -23%)	1,1 (▼ -27%)
Isopentanal	C1	1,78	1,68	0,23	0,35	1,02	1,42	1,03	0,87	1,56	1,18	0,62	0,21
	C2	0,6 (▼ -66%)	0,5 (▼ -70%)	1 (▲ 335%)	1,3 (▲ 271%)	0,7 (▼ -31%)	0,8 (▼ -44%)	1 (▼ -3%)	0,5 (▼ -43%)	0,5 (▼ -68%)	0,4 (▼ -66%)	1 (▲ 61%)	1,1 (▲ 424%)
Hexanal	C1	7,37	6,72	9,77	7,71	5,88	6,98	4,57	2,07	6,69	4,11	6,22	5,35
	C2	6,8 (▼ -8%)	6,7 (▼ -0,3%)	11,8 (▲ 21%)	12,1 (▲ 57%)	4,6 (▼ -22%)	4,3 (▼ -39%)	5,7 (▲ 25%)	3,5 (▲ 69%)	6,3 (▼ -6%)	3,8 (▼ -8%)	5,2 (▼ -16%)	5,1 (▼ -5%)
Benzaldeído	C1	0,52	0,43	0,31	0,34	1,29	1,27	0,6	0,89	0,38	0,77	0,39	0,44
	C2	0,2 (▼ -61%)	0,2 (▼ -53%)	0,4 (▲29%)	0,4 (▲ 18%)	0,2 (▼ -84%)	0,2 (▼ -84%)	0,3 (▼ -50%)	0,1 (▼ -88%)	0,38 (0%)	0,22 (▼ -71%)	0,4 (▲ 3%)	0,4 (▼ -9%)

Na Tabela 26 estão reunidos os resultados para os 10 compostos orgânicos voláteis específicos (benzeno, tolueno, estireno, tetracloroetileno, tricloroetileno, m-xileno, o-xileno, p-xileno, 1-4 diclorobenzeno, α -pineno). No geral, constata-se que não existem excedências para estes compostos em nenhuma sala de aula.

Tabela 16 — Tabela de [COV] da C₁ e C₂ (Escolas 1-6)

COV		µg/m³	E1:1	E1:2	E2:1	E2:2	E3:1	E3:2	E4:1	E4:2	E5:1	E5:2	E6:1	E6:2
Benzeno	C1	0,91	0,91	1,23	1,22	1,23	1,21	0,79	0,68	0,84	0,74	1,32	1,39	
	C2	0,74 (▼-19%)	0,61 (▼-33%)	0,69 (▼-44%)	0,55 (▼-55%)	0,64 (▼-48%)	0,59 (▼-51%)	0,88 (▲11%)	0,57 (▼-16%)	0,52 (▼-38%)	0 (▼-100%)	0,61 (▼-54%)	0,76 (▼-45%)	
Tolueno	C1	3,95	2,31	2,66	2,75	2,6	4,29	0,94	0,69	1,36	1	2,04	1,91	
	C2	1,6 (▼-59%)	4,4 (▲90%)	1,8 (▼-32%)	2,7 (▼-2%)	1,4 (▼-46%)	3,1 (▼-28%)	2 (▲113%)	0,96 (▲39%)	1,4 (0%)	0,48 (▼-52%)	0,81 (▼-60%)	1,9 (▼-1%)	
m+p-xileno	C1	6,68	2,92	4,77	2,49	3,73	3,51	0,88	1,49	0,76	0,77	5,63	4,95	
	C2	1,5 (▼-78%)	3,6 (▲23%)	1,8 (▼-62%)	2,6 (▲4%)	1,8 (▼-52%)	1,8 (▼-49%)	2,8 (▲218%)	1,6 (▲7%)	1,3 (▲71%)	0,43 (▼-44%)	0,99 (▼-82%)	2,2 (▼-56%)	
o-xilene	C1	1,51	0,76	1,65	0,79	1,25	1,18	0,25	0,58	0,25	0,26	1,74	1,45	
	C2	0,58 (▼-62%)	1,1 (▲45%)	0,66 (▼-60%)	0,86 (▲9%)	0,75 (▼-40%)	0,52 (▼-56%)	0,99 (▲296%)	0,6 (▲3%)	0,32 (▲28%)	0,12 (▼-54%)	0,4 (▼-77%)	0,79 (▼-46%)	
Etilbenzeno	C1	2,24	0,99	1,33	0,82	1,01	1,06	0,31	0,43	0,24	0,25	1,72	1,63	
	C2	0,48 (▼-79%)	1,2 (▲21%)	0,58 (▼-56%)	0,9 (▲10%)	0,52 (▼-49%)	0,62 (▼-42%)	0,92 (▲197%)	0,5 (▲16%)	0,43 (▲79%)	0,24 (▼-4%)	0,31 (▼-82%)	0,68 (▼-58%)	
Tricloroetileno	C1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
	C2	0,023 (▼-77%)	0,023 (▼-77%)	0,023 (▼-77%)	0,022 (▼-58%)	0,023 (▼-77%)	0,023 (▼-77%)	0,023	0,023 (▼-77%)	0,022 (▼-78%)	0,022 (▼-78%)	0,023 (▼-77%)	0,023 (▼-77%)	
Tetracloroetileno	C1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,06	0,06	0,06	0,06	0,1	0,1	
	C2	0,12 (▼-40%)	0,12 (▼-40%)	0,12	0,12 (▲20%)	0,12 (▲20%)	0,22 (▲120%)	0,15 (▲39%)	0,12 (▲100%)	0,048 (▼-20%)	0,048 (▼-20%)	0,072 (▼-28%)	0,17 (▲70%)	
Stireno	C1	0,37	0,44	0,42	0,48	0,24	0,36	0,29	0,18	0,35	0,29	0,39	0,4	
	C2	0,32 (▼-14%)	0,29 (▼-34%)	0,41 (▼-2%)	0,2 (▼-58%)	0,18 (▼-25%)	0,2 (▼-44%)	0,53 (▲83%)	0,2 (▲11%)	0,2 (▼-20%)	0,2 (▼-45%)	0,2 (▼-64%)	0,2 (▼-3%)	
1,4-diclorobenzeno	C1	0,08	0,08	0,1	0,07	0,1	0,07	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,07	
	C2	0,028 (▼-65%)	0,028 (▼-65%)	0,028 (▼-72%)	0,028 (▼-60%)	0,028 (▼-72%)	0,028 (▼-60%)	0,028 (▼-72%)	0,028 (▼-72%)	0,028 (▼-72%)	0,028 (▼-72%)	0,028 (▼-72%)	0,028 (▼-60%)	
Alfa-pineno	C1	1,06	1,32	2,79	1,01	0,25	0,25	0,1	0,1	2,44	0,1	0,1	0,1	
	C2	0,58 (▼-45%)	0,66 (▼-50%)	0,68 (▼-76%)	1,4 (▲39%)	0,29 (▲16%)	0,29 (▲16%)	0,29 (▲190%)	0,57 (▲470%)	0,57 (▼-77%)	0,19 (▲90%)	0,29 (▲190%)	0,29 (▲190%)	

CAPÍTULO 5 — Considerações finais, Limitações e Perspetivas futuras

5.1. Considerações finais

Não há dúvida de que a qualidade do ar ambiente é uma componente ambiental determinante, em particular para a saúde pública e para a qualidade de vida dos cidadãos. Neste sentido, as escolas representam um conjunto de edifícios nos quais é fundamental garantir uma QAI adequada, em função das suas características e especificidades dos seus ocupantes.

Inserido neste contexto, observou-se que os poluentes como PM_{10} , $PM_{2.5}$, CO_2 , COVT e aldeídos frequentemente excedem as diretrizes, ocorrendo em função de vários fatores, nomeadamente, a ausência de ventilação adequada e devido ao excesso de ocupação das salas.

Relativamente ao CO_2 , as concentrações médias verificadas estiveram acima dos valores permitidos pela legislação em 2/3 das salas, superando os teores encontrados em estudos como são o caso de Madureira et al. (2018) e Csobod et al. (2014). Além disso, a média do CO_2 para valores máximos encontrados alcançou 5590 ppm. Estes teores são bastante superiores a outros estudos realizados na Europa e são, sobretudo, reflexo dos níveis de ocupação dos espaços. É necessário investigar a relação entre ventilação inadequada em sala de aula e os resultados adversos à saúde em crianças.

Os elevados valores de COVS surgem de forma mais localizada, principalmente na E1:2, podendo estar associado a diferentes tipos de atividades realizadas, particularmente à possível utilização frequente de materiais pedagógicos, tais como tintas e colas, e à exposição dos trabalhos manuais pelo espaço, visto tratar-se de uma sala de aula com maior nível de atividades manuais.

Os teores de $PM_{2.5}$ entre todas as escolas apresentaram uma média de $27 \mu g/m^3$, encontrando-se acima dos limites da Portaria Portuguesa e dos valores guia da OMS, bem como de pesquisas realizadas na Europa, tais como aquelas no âmbito do projeto ClimACT. Para além disso, constatou-se que 58,3% das salas demonstraram teores de $PM_{2.5}$ acima da média.

Naquilo que diz respeito ao PM_{10} , verificou-se uma concentração média de $40,3 \mu g/m^3$, estando abaixo do valor guia preconizado pela OMS, mas acima dos valores encontrados por Santos and Ferreira (2018) e Almeida et al. (2011). Quando se comparam os valores obtidos de PM_{10} com o do $PM_{2.5}$, verificou-se que 41,7% das salas excederam a concentração preconizada pelas diretrizes, e que as escolas que possuem maiores médias são as mesmas em ambos os quesitos.

Os valores do PM_{10} também apresentaram variações ao longo do dia. Durante os

períodos ocupados, estes valores foram maiores do que nos não-ocupados, demonstrando que a ocupação, por meio da ressuspensão de partículas previamente depositadas e possível geração de partículas, tem influência nos níveis do interior destas partículas aerotransportadas.

A partir dos resultados obtidos constata-se que, para reduzir a exposição dos alunos ao COVT e CO₂ são necessárias algumas estratégias de controlo da qualidade do ar interior, de modo a evitar o acumular de poluentes no interior. Neste âmbito, pode-se citar a abertura de portas e janelas, uma vez que, foi possível concluir que as principais causas para as concentrações excessivas são oriundas dos próprios ocupantes e não do mobiliário. Adicionalmente, a redução dos poluentes que influenciam os ambientes interiores e a melhoria da ventilação também são alguns exemplos de como uma correta gestão da QAI pode melhorar o QAI e o conforto dos ocupantes.

Outra questão relevante e prioritária passa pela adoção da estratégia de controlo da fonte, uma vez que, prevenir a exposição é a forma mais eficaz de proteger a saúde humana das ameaças ambientais. Neste sentido, a ventilação deverá atuar no nível de exposição: os poluentes não retirados, emitidos da fonte, serão dispersos e diluídos por ventilação de forma a reduzir a sua concentração no espaço.

Corroborando a afirmativa de que o controlo de poluentes é mais eficaz e mais fácil de implementar no nível da fonte, verificou-se uma manutenção da tendência decrescente das concentrações no geral dos poluentes, após a primeira campanha (C₁). Tal facto levou a uma redução da exposição dos estudantes aos seus efeitos nocivos, em comparação aos resultados dos valores anteriores.

Devemos referir, ainda, que foi possível verificar que existe uma influência muito grande por parte dos indivíduos presentes no aumento dos poluentes em todos os ambientes interiores, tendo sido possível analisar e comprovar esta questão através do tratamento de dados, em conjunto com as folhas de registo.

Por fim, vale ressaltar que as conclusões obtidas neste trabalho se restringem ao universo da amostra estudada, não sendo representativa do universo total das escolas. Isto é particularmente importante, pois constata-se que, em Portugal, uma série de questões relativas aos projetos arquitetónicos e a redução de consumo de energia fizeram com que muitas escolas fossem construídas com particularidades que possibilitam a acumulação de poluentes do ar nas suas áreas internas. Nesse sentido, são necessários estudos mais detalhados acerca dos poluentes envolvidos, das fontes destes poluentes, das características físicas destes espaços e, ainda, da eficácia dos mecanismos de atenuação e controlo desta poluição.

5.2. Limitações

Existem algumas limitações para este estudo, dentro das quais podemos citar o facto de não ter sido possível analisar diretamente as relações entre emissões, concentrações de poluentes na qualidade do ar e efeitos na saúde, uma vez que não foram realizados inquéritos com os alunos, nem exames de saúde mais pormenorizados.

Além do mais, não foi possível estudar o transporte dos poluentes, as condições climáticas e os processos de transformação química, como por exemplo a formação de poluentes secundários.

Outra limitação que merece ser citada é o facto de não termos quantificado a taxa de ventilação da sala de aula e, portanto, não podemos ter a certeza de que as diferenças nas concentrações de CO₂ entre as salas de aula correspondiam às diferenças nas taxas de ventilação.

A recolha de dados da QA exterior também limitou o estudo, envolvendo diversos fatores, tal como a ausência da análise da taxa de ventilação, sendo apenas utilizado como indiciador o CO₂.

Tanto o número de escolas re-auditoradas neste estudo (C2 — 100%), como o rigor da metodologia da auditoria base (C1), e a quantidade de dados recolhidos apresentam-se como pontos fortes que ajudam a sustentar o resultado deste estudo.

Por último, a sazonalidade não foi considerada no estudo. Não obstante, trata-se de uma variável importante, merecedora de ser objeto de estudo e análise em pesquisas futuras.

5.3. Perspetivas Futuras

Promover a participação em iniciativas de divulgação de boas práticas, em matéria de manutenção da QAI, através de atos de divulgação e sensibilização à população, aproveitando nomeadamente o potencial dos meios de comunicação local.

Promover igualmente programas de educação ambiental nas escolas sobre a problemática da qualidade do ar, com vista à sensibilização da população mais jovem, bem como o grupo de professores, tornando visível o papel que cada um pode desempenhar na adoção de soluções, designadamente no que respeita à alteração de comportamentos e à introdução de decisões que acabam por ter um impacto direto na capacidade de diversos ambientes influenciarem, de forma negativa, os estudantes.

Os professores, face à sua adjacência com os alunos, afiguram-se como entidades fundamentais para promover, numa lógica local, a manutenção de uma QAI aceitável, assumindo-se como atores chave ao nível local para a prossecução dos valores limites estabelecidos pela legislação. Pequenas ações como, por exemplo, a ventilação dos espaços fechados, podem ajudar a melhorar a qualidade do ar.

Referências Bibliográficas

- Agência Europeia do Ambiente. *European Air Quality Index*.
<https://airindex.eea.europa.eu/Map/AQI/Viewer/>
- Agência Europeia do Ambiente. (2016). *European Union emission inventory report 1990–2014 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP)*.
- Agência Europeia do Ambiente. (2020a). *Air pollution country fact sheets 2020*.
<https://www.eea.europa.eu/themes/air/country-fact-sheets/2020-country-fact-sheets/air-pollution-country-fact-sheets>
- Agência Europeia do Ambiente. (2020b). *Air quality in Europe - 2020 report*.
<https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2020-report>
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2009). *Qualidade do Ar em Espaços Interiores - Um Guia Técnico*. Agência Portuguesa do Ambiente.
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2015a). *Metodologia de avaliação da qualidade do ar no interior de edifícios de comércio e serviços no âmbito da Portaria 353-A/2013, de 4 de dezembro*.
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2015b). *Relatório do Estado do Ambiente - 2015*.
https://sniambgeoviewer.apambiente.pt/GeoDocs/geoportaldocs/rea/REA2016/REA_2015_White_Final.pdf
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2018). *Relatório do Estado do Ambiente 2018*.
<https://sniambgeoviewer.apambiente.pt/GeoDocs/geoportaldocs/rea/REA2018/REA2018.pdf>
- Al horr, Y., Arif, M., Katafygiotou, M., Mazroei, A., Kaushik, A., & Elsarrag, E. (2016). Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: A review of the literature. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(1), 1-11.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2016.03.006>
- Almeida, S. M., Canha, N., Silva, A., Freitas, M. C., Pegas, P., Alves, C., Evtugina, M., & Pio, C. A. (2011). Children exposure to atmospheric particles in indoor of Lisbon primary schools. *Atmospheric Environment*, 45(40), 7594-7599.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.11.052>
- Almeida, S. M., Freitas, M. C., Repolho, C., Dionísio, I., Dung, H. M., Pio, C. A., Alves, C., Caseiro, A., & Pacheco, A. M. G. (2009). Evaluating children exposure to air pollutants for an epidemiological study. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 280(2), 405-409. <https://doi.org/10.1007/s10967-009-0535-3>
- Almeida, S. M., Silva, A. V., & Sarmiento, S. (2014). Effects of Exposure to Particles and Ozone on Hospital Admissions for Cardiorespiratory Diseases in Setúbal, Portugal. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 77(14-16), 837-848.
<https://doi.org/10.1080/15287394.2014.887399>
- Anderson, J. O., Thundiyil, J. G., & Stolbach, A. (2012). Clearing the Air: A Review of the Effects of Particulate Matter Air Pollution on Human Health. *Journal of Medical Toxicology*, 8(2), 166-175. <https://doi.org/10.1007/s13181-011-0203-1>

- Annesi-Maesano, I., Baiz, N., Banerjee, S., Rudnai, P., Rive, S., & the, S. G. (2013). Indoor Air Quality and Sources in Schools and Related Health Effects. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 16(8), 491-550. <https://doi.org/10.1080/10937404.2013.853609>
- Blondeau, P., Iordache, V., Poupard, O., Genin, D., & Allard, F. (2005). Relationship between outdoor and indoor air quality in eight French schools. *Indoor Air*, 15(1), 2-12. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00263.x>
- Canha, N., Mandin, C., Ramalho, O., Wyart, G., Ribéron, J., Dassonville, C., Hänninen, O., Almeida, S. M., & Derbez, M. (2016). Assessment of ventilation and indoor air pollutants in nursery and elementary schools in France. *Indoor Air*, 26(3), 350-365. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ina.12222>
- Cavaleiro Rufo, J., Madureira, J., Oliveira Fernandes, E., & Moreira, A. (2016). Volatile organic compounds in asthma diagnosis: a systematic review and meta-analysis. *Allergy*, 71(2), 175-188. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/all.12793>
- ClimACT. (2017). *Guidelines of Standard Methodologies to Conduct Energy and Environment Audits in Schools*.
- Coentro, S. R. C. (2015). *Qualidade do Ar Interior em habitações: Fontes emissoras de poluentes* [Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa].
- Conselho Nacional de Educação. (2020). *Estado da Educação 2019*. https://www.cnedu.pt/content/edicoes/estado_da_educacao/EE2019_Digital_Site.pdf
- Cornet, M., Duerinck, J., Laes, E., Lodewijks, P., Meynaerts, E., Pestiaux, J., Renders, N., & Vermeulen, P. (2013). *Scenarios for a Low Carbon Belgium by 2050 (Final Report)*. Climact & VITO. <https://climat.be/doc/low-carbon-scenarios-for-be-2050-final-report.pdf>
- Csobod, E., Annesi-Maesano, I., Carrer, P., Kephelopoulos, S., Madureira, J., Rudnai, P., Oliveira Fernandes, E., Barrero, J., Beregszászi, T., Hyvärinen, A., Moshhammer, H., Norback, D., Páldy, A., Pándics, T., Sestini, P., Stranger, M., Taubel, M., Varró, M., Vaskovi, E., Ventura Silva, G., & Viegi, G. (2014). SINPHONIE - Schools Indoor Pollution and Health Observatory Network in Europe - Final Report. In: Publications Office of the European Union.
- d'Espiney, A. C. (2017). *Economia de Baixo Carbono nas Escolas - Indicadores-chave de desempenho do projeto ClimACT* [Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Instituto Superior Técnico]. Lisboa.
- Diretiva 2008/50/C3 do Parlamento Europeu e do Conselho, Jornal Oficial da União Europeia L.152 (2008). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0050&from=PT>
- Fisk, W. J., Chan, W. R., & Johnson, A. L. (2019). Does dampness and mold in schools affect health? Results of a meta-analysis. *Indoor Air*, 29(6), 895-902. <https://doi.org/10.1111/ina.12588>
- Fromme, H., Twardella, D., Dietrich, S., Heitmann, D., Schierl, R., Liebl, B., & Rüdén, H. (2007). Particulate matter in the indoor air of classrooms—exploratory results from

- Munich and surrounding area. *Atmospheric Environment*, 41(4), 854-866. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.08.053>
- Gaihe, S., Semple, S., Miller, J., Fielding, S., & Turner, S. (2014). Classroom Carbon Dioxide Concentration, School Attendance, and Educational Attainment. *Journal of School Health*, 84(9), 569-574. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/josh.12183>
- Gil-Baez, M., Barrios-Padura, Á., Molina-Huelva, M., & Chacartegui, R. (2017). Natural ventilation systems in 21st-century for near zero energy school buildings. *Energy*, 137, 1186-1200. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.188>
- Hamehkasi, M. (2016). *Effects of Low Humidity on Comfort, Health, and Indoor Environmental Quality: Literature review* [Relatório para a obtenção do grau de Mestre no Departamento de Engenharia Biológica e Agrícola, Kansas State University].
- Haverinen-Shaughnessy, U., Moschandreas, D. J., & Shaughnessy, R. J. (2011). Association between standard classroom ventilation rates and students' academic achievement. *Indoor Air*, 21(2), 121-131. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00686.x>
- Health Effects Institute. (2020). *State of Global Air 2020 - a special report on global exposure to air pollution and its health impacts*. https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/documents/2020-10/soga-2020-report-10-26_0.pdf
- Instituto Nacional de Estatística. (2019a). *Área Metropolitana de Lisboa em Números - 2017*. https://www.ine.pt/ine_novidades/RN2017/lisboa/
- Instituto Nacional de Estatística. (2019b). *Estatísticas Demográficas: 2018*. <https://www.ine.pt/xurl/pub/358632586>
- Instituto Nacional de Estatística. (2020). *Área Metropolitana de Lisboa em Números - 2018*. https://www.ine.pt/ine_novidades/RN2018/lisboa/index.html
- Jones, B., & Molina, C. (2017). Indoor Air Quality. In M. A. Abraham (Ed.), *Encyclopedia of Sustainable Technologies* (pp. 197-207). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10198-8>
- Laumbach, R. J. (2008). Sick Building Syndrome. In H. K. Heggenhougen (Ed.), *International Encyclopedia of Public Health* (pp. 4-8). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-012373960-5.00300-2>
- Lee, S. C., & Chang, M. (1999). Indoor Air Quality Investigations at Five Classrooms. *Indoor Air*, 9(2), 134-138. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1999.t012-00008.x>
- Lee, S. C., & Chang, M. (2000). Indoor and outdoor air quality investigation at schools in Hong Kong. *Chemosphere*, 41(1), 109-113. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00396-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00396-3)
- Madureira, J., Aguiar, L., Pereira, C., Mendes, A., Querido, M. M., Neves, P., & Teixeira, J. P. (2018). Indoor exposure to bioaerosol particles: levels and implications for inhalation dose rates in schoolchildren. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 11(8), 955-964. <https://doi.org/10.1007/s11869-018-0599-8>

- Madureira, J., Paciência, I., Pereira, C., Teixeira, J. P., & Fernandes, E. d. O. (2016). Indoor air quality in Portuguese schools: levels and sources of pollutants. *Indoor Air*, 26(4), 526-537. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ina.12237>
- Madureira, J., Paciência, I., Rufo, J., Ramos, E., Barros, H., Teixeira, J. P., & de Oliveira Fernandes, E. (2015). Indoor air quality in schools and its relationship with children's respiratory symptoms. *Atmospheric Environment*, 118, 145-156. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.07.028>
- Mendell, M. J., & Heath, G. A. (2005). Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. *Indoor Air*, 15(1), 27-52. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00320.x>
- Mendes, A., Aelenei, D., Papoila, A. L., Carreiro-Martins, P., Aguiar, L., Pereira, C., Neves, P., Azevedo, S., Cano, M., Proença, C., Viegas, J., Silva, S., Mendes, D., Neuparth, N., & Teixeira, J. P. (2014). Environmental and Ventilation Assessment in Child Day Care Centers in Porto: The Envirh Project. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 77(14-16), 931-943. <https://doi.org/10.1080/15287394.2014.911134>
- Observatório Nacional das Doenças Respiratórias. (2017). *Relatório 2017*. <http://respirarmelhor.pt/wp-content/uploads/2017/11/Relatório-Completo-ONDR-2017.pdf>
- Organização Internacional de Normalização [ISO]. (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. In (Vol. ISO 7730/2005).
- Organização Mundial de Saúde. (2000). *The Right to Healthy Indoor Air*.
- Organização Mundial de Saúde. (2006). *WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69477/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf?sequence=1
- Organização Mundial de Saúde. (2010). *WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK138705/>
- Organização Mundial de Saúde. (2016). *Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease*. Organização Mundial de Saúde. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/250141>
- Organização Mundial de Saúde. (2017). *Evolution of WHO air quality guidelines: past, present and future*. https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0019/331660/Evolution-air-quality.pdf
- Ormandy, D., & Ezratty, V. (2012). Health and thermal comfort: From WHO guidance to housing strategies. *Energy Policy*, 49, 116-121. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.003>
- Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press.
- Pegas, P. N., Nunes, T., Alves, C. A., Silva, J. R., Vieira, S. L. A., Caseiro, A., & Pio, C. A. (2012). Indoor and outdoor characterisation of organic and inorganic compounds in city

- centre and suburban elementary schools of Aveiro, Portugal. *Atmospheric Environment*, 55, 80-89. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.03.059>
- Petersen, S., Jensen, K. L., Pedersen, A. L. S., & Rasmussen, H. S. (2016). The effect of increased classroom ventilation rate indicated by reduced CO₂ concentration on the performance of schoolwork by children. *Indoor Air*, 26(3), 366-379. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ina.12210>
- Ramos, C. A. A. M. C. (2013). *Qualidade do Ar Interior em Ginásios - Exposição a poluentes do ar interior durante a atividade física* [Dissertação elaborada com vista à obtenção do grau de Mestre em Gestão Integrada da Qualidade, Ambiente e Segurança, Instituto Superior de Educação e Ciências]. Lisboa. https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/9022/1/Tese%20MsC_%20Carla%20Ramos.pdf
- Regulamento (UE) 2018/1999 do Parlamento Europeu e do Conselho de 11 de dezembro de 2018. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R1999&from=EN>
- Ribéron, J., Derbez, M., Lethrosne, M., & Kirchner, S. (2011). Impact of airing behaviour on air stuffiness in schools and daycares centres: Development of a specific tool for ventilation management. *12th International Conference on Indoor Air Quality and Climate 2011*, 2, 1031-1032.
- Rocha, C. L. P. (2015). *Percepções sociais dos portugueses face aos riscos associados às alterações climáticas* [Tese de doutoramento para obtenção do grau de Doutor em Ciências e Engenharia do Ambiente, Universidade de Aveiro].
- Rodrigues, F. J. M. (2013). *Avaliação da qualidade do ar interior em salas de aulas sem sistema AVAC* [Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Tecnologia Ambiental, Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Bragança].
- Santos, A. C., & Ferreira, L. (2018). 13º Relatório do Observatório nacional das doenças respiratórias 2016/2017. <http://respirarmelhor.pt/>
- Seguel, J. M., Merrill, R., Seguel, D., & Campagna, A. C. (2017). Indoor Air Quality. *American Journal of Lifestyle Medicine*, 11(4), 284-295. <https://doi.org/10.1177/1559827616653343>
- Śmiełowska, M., Marć, M., & Zabiegała, B. (2017). Indoor air quality in public utility environments—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(12), 11166-11176. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8567-7>
- Sundell, J. (2004). On the history of indoor air quality and health. *Indoor Air*, 14(s7), 51-58. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00273.x>
- Sundell, J. (2017). Reflections on the history of indoor air science, focusing on the last 50 years. *Indoor Air*, 27(4), 708-724. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ina.12368>
- Sunyer, J., Esnaola, M., Alvarez-Pedrerol, M., Forns, J., Rivas, I., López-Vicente, M., Suades-González, E., Foraster, M., Garcia-Esteban, R., Basagaña, X., Viana, M., Cirach, M., Moreno, T., Alastuey, A., Sebastian-Galles, N., Nieuwenhuijsen, M., & Querol, X. (2015). Association between Traffic-Related Air Pollution in Schools and Cognitive

- Development in Primary School Children: A Prospective Cohort Study. *PLOS Medicine*, 12(3), e1001792. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1001792>
- Torres, P., Ferreira, J., Monteiro, A., Costa, S., Pereira, M. C., Madureira, J., Mendes, A., & Teixeira, J. P. (2018). Air pollution: A public health approach for Portugal. *Science of The Total Environment*, 643, 1041-1053. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.281>
- US-EPA. *Particulate Matter (PM) Basics*. <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>
- US-EPA. (1991). *Indoor Air Facts No. 4 - Sick Building Syndrome*. https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-08/documents/sick_building_factsheet.pdf
- US-EPA. (2010). *A Brief Guide to Mold, Moisture and your Home*. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-10/documents/moldguide12.pdf>
- US-EPA. (2012). *Provisional Assessment Of Recent Studies On Health Effects Of Particulate Matter Exposure*. <https://cfpub.epa.gov/ncea/isa/recordisplay.cfm?deid=247132>
- US-EPA. (2019). *Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter (Final Report, 2019)*.
- Vassella, C. C., Koch, J., Henzi, A., Jordan, A., Waeber, R., Iannaccone, R., & Charrière, R. (2021). From spontaneous to strategic natural window ventilation: Improving indoor air quality in Swiss schools. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 234, 113746. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113746>
- Vornanen-Winqvist, C. (2020). *Indoor air contaminants, symptoms and effects of mechanical ventilation in school buildings* [Dissertação de doutoramento para obtenção do grau de Doutor em Ciências (Tecnologia), Escola de Engenharia da Universidade Aalto].
- Wang, G., Zhang, R., Gomez, M. E., Yang, L., Levy Zamora, M., Hu, M., Lin, Y., Peng, J., Guo, S., Meng, J., Li, J., Cheng, C., Hu, T., Ren, Y., Wang, Y., Gao, J., Cao, J., An, Z., Zhou, W., Li, G., Wang, J., Tian, P., Marrero-Ortiz, W., Secrest, J., Du, Z., Zheng, J., Shang, D., Zeng, L., Shao, M., Wang, W., Huang, Y., Wang, Y., Zhu, Y., Li, Y., Hu, J., Pan, B., Cai, L., Cheng, Y., Ji, Y., Zhang, F., Rosenfeld, D., Liss, P. S., Duce, R. A., Kolb, C. E., & Molina, M. J. (2016). Persistent sulfate formation from London Fog to Chinese haze. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(48), 13630-13635. <https://doi.org/10.1073/pnas.1616540113>
- Wyon, D. P. (2004). The effects of indoor air quality on performance and productivity. *Indoor Air*, 14 Suppl 7, 92-101. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00278.x>
- Yang, J., Nam, I., Yun, H., Kim, J., Oh, H.-J., Lee, D., Jeon, S.-M., Yoo, S.-H., & Sohn, J.-R. (2015). Characteristics of indoor air quality at urban elementary schools in Seoul, Korea: Assessment of effect of surrounding environments. *Atmospheric Pollution Research*, 6(6), 1113-1122. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apr.2015.06.009>

Legislação

Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas, (1992).

Decreto-Lei n.º 102/2010, que estabelece o regime de avaliação e gestão da qualidade do ar, Diário da República n.º 186/2010, Série I de 2010-09-23 4177-4205 (2010). <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/102/2010/09/23/p/dre/pt/html>

Decreto-Lei n.º 118/2013, que aprova o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços, e transpõe a Diretiva n.º 2010/31/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010, relativa ao desempenho energético dos edifícios, Diário da República n.º 159/2013, Série I de 2013-08-20 4988 - 5005 (2013). <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/118/2013/08/20/p/dre/pt/html>

Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, Jornal Oficial da União Europeia L.153 de 18 de junho de 2010 13-25 (2010). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031&from=RO>

Portaria n.º 353-A/2013, que estabelece os valores mínimos de caudal de ar novo por espaço, bem como os limiares de proteção e as condições de referência para os poluentes do ar interior dos edifícios de comércio e serviços novos, sujeitos a grande intervenção e existentes e a respetiva metodologia de avaliação, Diário da República n.º 235/2013, 1º Suplemento, Série I de 2013-12-04 6644-(6642) a 6644-(6649) (2013). <https://data.dre.pt/eli/port/353-a/2013/12/04/p/dre/pt/html>

Resolução do Conselho de Ministros n.º 53/2020, que aprova o PNEC 2030, Diário da República n.º 133/2020, Série I de 2020-07-10 (2020). <https://dre.pt/home/-/dre/137618093/details/maximized>

ANEXOS

Anexo I — Tabela de Frequência dos Equipamentos

Tabela 17 — Tabela de frequência dos equipamentos utilizados

	E1: 1	E1: 2	E2: 1	E2: 2	E3: 1	E3: 2	E4: 1	E4: 2	E5: 1	E5: 2	E6: 1	E6: 2
CO	5 sec	1 min	5 sec	1 min	1 min	1 min	5 sec	5 sec	1 min	5 sec	5 min	5 min
CO₂	n.a.											
COVT	n.a.											
CH₂O	5min	5 min	5 min	5 min	5 min	5 min	5 min	5 min	5 min	5 min	5 min	5 min
PMx	n.a.	1 min	1 min	1 min	1 min	1 min	1 min	1 min	1 min	1 min	1 min	1 min