



NOVA
NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

RICARDO LUÍS PEREIRA AMADO
Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

AVALIAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DOS POLUENTES AÉREOS EXTERIORES NA QUALIDADE DO AR INTERIOR

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL

Universidade NOVA de Lisboa
setembro, 2024



AVALIAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DOS POLUENTES AÉREOS EXTERIORES NA QUALIDADE DO AR INTERIOR

Ricardo Luís Pereira Amado
Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Orientador: Luís Gonçalo Correia Baltazar
Professor Associado, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: João Carlos Rocha de Almeida
Professor Associado, Universidade NOVA de Lisboa

Arguente: Hugo Entradas Silva
Investigador Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Vogal: Luís Gonçalo Correia Baltazar
Professor Associado, Universidade NOVA de Lisboa

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL

Universidade NOVA de Lisboa
setembro, 2024

Avaliação da Contribuição dos Poluentes Aéreos Exteriores na Qualidade do Ar Interior

Copyright © Ricardo Luís Pereira Amado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

A vós, todos aqueles que me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

A conclusão da presente dissertação marca o culminar de um capítulo exigente, desafiante, mas acima de tudo gratificante. Chegar até aqui não seria possível sem o apoio e ajuda de várias pessoas a quem gostaria de expressar a minha mais sincera gratidão.

Em primeiro lugar, ao meu orientador, Professor Luís Baltazar, pelo apoio, disponibilidade e ajuda ao longo de todas as etapas de execução do trabalho desenvolvido.

Em segundo lugar, à minha família, cujo apoio incondicional foi fundamental ao longo de toda a minha caminhada académica. À minha mãe, pela sua dedicação, incentivo e força que me transmitiu em todos os momentos, em especial nos mais difíceis. O seu exemplo de perseverança e resiliência inspiraram-me a nunca desistir perante qualquer que fosse o obstáculo. À minha avó, pelos conselhos, sabedoria e carinho que sempre estiveram presentes em todas as etapas alcançadas. A ambas, o mais profundo obrigado por me darem a serenidade e lucidez necessárias para enfrentar cada desafio ao longo do meu percurso.

Aos meus amigos, que serão sempre uma família, pela vossa presença que foi fundamental para manter o equilíbrio emocional, pela disponibilidade em ouvir, partilhar momentos de descontração, pelo apoio entre tantos outros adjetivos possíveis para enaltecer o contributo que tiveram para que conseguisse alcançar este objetivo.

À Carolina, o meu pilar durante a etapa final do meu percurso, por ter sido um porto seguro, pela motivação, carinho e por ser um exemplo para mim.

O presente trabalho é o resultado de um esforço coletivo, onde cada um, à sua maneira, desempenhou um papel fulcral.

A todos, estarei sempre eternamente grato.

*“The mind that opens to new ideas never returns
to its original size”
(Albert Einstein)*

RESUMO

O aumento da permanência em ambientes fechados eleva a importância da qualidade do ar interior dos edifícios. Disponibilizar um ambiente interior adequado ao tempo de permanência dos ocupantes deve ser uma prioridade. É necessário aprimorar e desenvolver soluções que viabilizem sistemas de ventilação que cumpram os requisitos no que diz respeito à qualidade do ar interior.

A ventilação natural é uma estratégia de ventilação passiva que além de apresentar o potencial de reduzir significativamente o consumo energético dos edifícios, desempenha ainda um papel central na qualidade do ar interior. No entanto, a sua eficácia é limitada por diversas variáveis, tais como, o clima, edifícios adjacentes, a poluição do ar exterior, a localização geográfica e a posição de aberturas localizadas nas paredes de fachada.

A presente dissertação aborda a avaliação do impacto de diferentes estratégias de ventilação natural na qualidade interior de edifícios localizados em centros urbanos. Recorreu-se a simulações CFD com recurso ao software *CONTAM* com o objetivo de modelar as diferentes estratégias de ventilação natural. O presente estudo centrou-se em quatro diferentes estratégias de ventilação natural: unilateral, cruzada, sem tiragem térmica e ventilação noturna. Foram considerados cinco poluentes aéreos exteriores: material particulado ($PM_{2,5}$ e PM_{10}), ozono, dióxido de enxofre e dióxido de azoto. O principal objetivo centrou-se na importância de determinar e compreender o efeito que diferentes estratégias de ventilação natural apresentam na introdução de poluentes exteriores no ambiente dos edifícios em centros urbanos poluídos.

As principais conclusões obtidas foram as seguintes: a adoção de diferentes estratégias de ventilação natural apresentam impactos distintos na qualidade do ar interior; o clima exterior e a localização de cada compartimento têm um papel fundamental na introdução de poluentes exteriores; a qualidade do ar de Lisboa afeta fortemente a preservação de material sensível presente no interior de museus; os poluentes O_3 , NO_2 e PM_{10} mostraram-se os mais impactantes na qualidade do ar interior.

A adaptação das estratégias de ventilação natural às condições climáticas e níveis de poluição é essencial para melhorar a qualidade do ar interior.

Palavras-chave: Ventilação Natural; Ozono; Dióxido de Enxofre; Dióxido de Azoto;
PM_{2,5}; PM₁₀; CONTAM

ABSTRACT

The increase in time spent indoors has increased the importance of indoor air quality in buildings. Providing a suitable indoor environment for the occupants should be a priority. It is necessary to improve and develop solutions that enable ventilation systems to meet the highest standards of indoor air quality.

Natural ventilation is a passive ventilation strategy that not only has the potential to significantly reduce the energy consumption of buildings but also plays a central role in indoor air quality. However, several variables limit its effectiveness, including climate, adjacent buildings, outdoor air pollution, geographical location and the positioning of openings

The present dissertation addresses the evaluation of the impact of different natural ventilation strategies on the indoor air quality of buildings located in urban centers. CFD simulations using the CONTAM analysis software were employed to model the different natural ventilations strategies. The study focused on four distinct natural ventilation strategies: single-sided, cross ventilation, ventilation without thermal buoyancy and night ventilation. Five outdoor air pollutants were considered: particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, sulphur dioxide and nitrogen dioxide. The main objective was to determine and understand the effect of different natural ventilation strategies have on the introduction of outdoor pollutants into the indoor environment of buildings in polluted urban areas. The analysis was based on the impact of pollutants on occupants and artefacts in buildings of high heritage value.

The main conclusions reached were: the adoption of different natural ventilation strategies has different impacts on IAQ; the outdoor climate and the location of each room play a fundamental role in the introduction of outdoor pollutants; Lisbon's air quality strongly affects the preservation of sensitive material present inside museums; the pollutants O₃, NO₂ and PM₁₀ have been shown to have the greatest impact on IAQ.

Adapting natural ventilation strategies to the climatic conditions and pollution levels is essential to achieve improvements in indoor air quality.

Keywords: Natural Ventilation; Ozone; Sulphur Dioxide; Nitrogen Dioxide; $PM_{2.5}$; PM_{10} ; CONTAM

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. MOTIVAÇÃO E ENQUADRAMENTO DO TEMA | 1 |
| 1.2. OBJETIVOS DA INVESTIGAÇÃO | 1 |
| 1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO | 2 |
| 2. VENTILAÇÃO NATURAL E QAI EM EDIFÍCIOS | 3 |
| 2.1 QUALIDADE DO AR INTERIOR | 3 |
| 2.1.1 Conforto e saúde dos ocupantes | 4 |
| 2.1.2 Impacto material | 9 |
| 2.2 VENTILAÇÃO NATURAL | 14 |
| 2.2.1 Caudal escoado por ventilação | 16 |
| 2.2.2 Caudal escoado por infiltração | 17 |
| 2.2.3 Mecanismos de ventilação natural | 17 |
| 2.2.4 Estratégias de ventilação natural | 25 |
| 2.3 POLUENTES AÉREOS | 27 |
| 2.3.1 Compostos de Enxofre (SO _x) | 32 |
| 2.3.2 Ozono (O ₃) | 34 |
| 2.3.3 Óxidos de Azoto (NO _x) | 36 |
| 2.3.4 Material particulado (PM ₁₀ e PM _{2,5}) | 37 |
| 2.4 ENQUADRAMENTO LEGAL E NORMATIVO | 40 |
| 2.4.1 ASHRAE 62.1 / 2015 ASHRAE Handbook | 40 |
| 2.4.2 CIBSE Guide A | 43 |
| 2.4.3 PD CR 1752 | 45 |
| 2.4.4 EN 15251 | 47 |
| 3. METODOLOGIA | 49 |
| 3.1 CASO DE ESTUDO | 49 |
| 3.2 CLIMA | 50 |
| 3.2 CONTAM | 51 |
| 3.2.1 Parâmetros de entrada | 52 |
| 3.3 SIMULAÇÕES | 62 |
| 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS | 64 |
| 4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS | 64 |
| 4.1.1 Sim1_Base | 64 |
| 4.1.2 Sim1.2_Base | 67 |
| 4.1.3 Sim1.3_Base | 69 |
| 4.2 ESTRATÉGIAS DE VENTILAÇÃO NATURAL | 70 |
| 4.2.1 Sim_2.1 – Sem tiragem térmica | 71 |
| 4.2.2 Sim_2.2 – Ventilação Unilateral | 76 |
| 4.2.3 Sim_2.3 – Ventilação Cruzada | 84 |

| | |
|--|------------|
| 4.2.4 <i>Sim_2.4 – Janelas Fechadas no Inverno</i> | 94 |
| 4.2.5 <i>Sim_2.5 – Ventilação Noturna</i> | 100 |
| 4.3 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS..... | 108 |
| 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS | 116 |
| 5.1 CONCLUSÕES GERAIS | 116 |
| 5.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS | 117 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 119 |
| ANEXOS | 125 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 2.1 - PRINCIPAIS FONTES DE POLUENTES DO AR INTERIOR [13] | 5 |
| FIGURA 2.2 - RELAÇÃO ENTRE A PORCENTAGEM DE PESSOAS INSATISFEITAS COM A QAI E TAXA DE VENTILAÇÃO [8]..... | 6 |
| FIGURA 2.3 - MORTES PREMATURAS GLOBAIS RELACIONADAS COM RISCOS AMBIENTAIS. (ADAPTADO DE: [1])..... | 8 |
| FIGURA 2.4 - PONTO DE CEDÊNCIA PARA UMA AMOSTRA DE MADEIRA [34]..... | 10 |
| FIGURA 2.5 - RESPOSTA DO CHOUPO A VARIAÇÕES DE HUMIDADE RELATIVA [36]..... | 11 |
| FIGURA 2.6 - CONDIÇÕES FAVORÁVEIS AO CRESCIMENTO DE FUNGOS [40]..... | 13 |
| FIGURA 2.7 - DIAGRAMA PSICOMÉTRICO [46]..... | 15 |
| FIGURA 2.8 - EFEITO CHAMINÉ. A) ESQUEMA DE ENTRADA E SAÍDA DO FLUXO DE AR; B) DIAGRAMA DE PRESSÕES [57]..... | 18 |
| FIGURA 2.9 - DIREÇÃO DO FLUXO DE AR QUANDO $\theta_o > \theta_i$ [49]..... | 19 |
| FIGURA 2.10 - VENTILAÇÃO POR TIRAGEM TÉRMICA [115]..... | 19 |
| FIGURA 2.11 - ENTRADAS E SAÍDAS DE AR A ALTURAS DIFERENTES [46]..... | 20 |
| FIGURA 2.12 - PRESSÃO INDUZIDA PELO VENTO NA ENVOLVENTE DE UM EDIFÍCIO GENÉRICO [49]..... | 20 |
| FIGURA 2.13 - (A) COEFICIENTE DE PRESSÃO NA FACHADA DE BARLAVENTO PARA UMA DIREÇÃO DO VENTO PERPENDICULAR À FACHADA. (B) CAMPO VETORIAL DA VELOCIDADE NA SECÇÃO TRANSVERSAL [51]..... | 21 |
| FIGURA 2.14 - (C) DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE C_p . (D) CAMPO VETORIAL DA VELOCIDADE NA SECÇÃO TRANSVERSAL [51] | 21 |
| FIGURA 2.15 - ENTRADAS E SAÍDAS DE AR NA MESMA FACHADA [55]..... | 24 |
| FIGURA 2.16 - ENTRADAS E SAÍDAS DE AR EM AMBAS AS FACHADAS [46]..... | 24 |
| FIGURA 2.17 - VENTILAÇÃO POR EFEITO COMBINADO: RELAÇÃO ENTRE DIREÇÃO DO FLUXO DE AR, PRESSÃO E ALTURA DO EDIFÍCIO [56]..... | 25 |
| FIGURA 2.18 - VENTILAÇÃO UNILATERAL [57]..... | 26 |
| FIGURA 2.19 - VENTILAÇÃO CRUZADA [57]..... | 27 |
| FIGURA 2.20 - CONTRIBUIÇÃO DO TRÁFEGO AUTOMÓVEL E OUTRAS FONTES PARA A POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA [68]..... | 29 |
| FIGURA 2.21 - REDE MONITORIZAÇÃO RLVT [70]..... | 31 |
| FIGURA 2.22 - FORMAÇÃO ÁCIDO SULFÚRICO [77]..... | 32 |
| FIGURA 2.23 - DEGRADAÇÃO POR REAÇÃO QUÍMICA [75]..... | 33 |
| FIGURA 2.24 - FORMAÇÃO DE OZONO A PARTIR DE ÓXIDOS DE AZOTO. (ADAPTADO DE: [77])..... | 34 |
| FIGURA 2.25 - AVALIAÇÃO DO OBJETIVO DE LONGO PRAZO PARA A PROTEÇÃO DA SAÚDE HUMANA PARA O OZONO EM 2022 [70]..... | 36 |
| FIGURA 2.26 - EMISSÕES DE NOX POR CATEGORIA [66]..... | 37 |
| FIGURA 2.27 - FORMAÇÃO ÁCIDO NÍTRICO [77]..... | 37 |
| FIGURA 2.28 - EVOLUÇÃO DA MÉDIA ANUAL DE PM10 NAS ZONAS DA RLVT [70]..... | 39 |
| FIGURA 2.29 - DEPOSIÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO EM EDIFÍCIOS [93]..... | 40 |
| FIGURA 2.30 - REDUÇÃO DA TAXA DE VENTILAÇÃO COM RECURSO A AR EXTERIOR PARA UMA FONTE DE POLUIÇÃO VARIÁVEL [49]..... | 44 |
| FIGURA 3.1 - PLANTA DO EDIFÍCIO EM ESTUDO..... | 49 |
| FIGURA 3.2 - CLIMA DE PORTUGAL CONTINENTAL SEGUNDO CLASSIFICAÇÃO KÖPPEN [100]..... | 50 |
| FIGURA 3.3 - EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA MÉDIA EM LISBOA. (ADAPTADO DE:[116])..... | 51 |
| FIGURA 3.4 - VARIAÇÃO DE TEMPERATURA ANUAL EM LISBOA. (ADAPTADO DE:[105])..... | 53 |
| FIGURA 3.5 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA MENSAL DE DIÓXIDO DE ENXOFRE..... | 54 |
| FIGURA 3.6 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA MENSAL DE PM2.5..... | 54 |
| FIGURA 3.7 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA MENSAL DE PM10..... | 55 |
| FIGURA 3.8 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA MENSAL DE OZONO..... | 55 |
| FIGURA 3.9 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA MENSAL DE DIÓXIDO DE AZOTO..... | 56 |
| FIGURA 3.10 - INTERFACE DO PROGRAMA TAXA DE DEPOSIÇÃO DO PM2.5..... | 57 |
| FIGURA 3.11 - MODELO INTRODUZIDO NO CONTAM..... | 58 |
| FIGURA 3.12 - ORIENTAÇÃO VENTO PREDOMINANTE..... | 59 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 3.13 - CORTE DA FACHADA SUL /SUDESTE..... | 59 |
| FIGURA 3.14 - LAYOUT PROGRAMA MODELO DE ESCOAMENTO VÃOS ENVIDRAÇADOS | 60 |
| FIGURA 3.15 - EXEMPLO DE UM PERFIL DE PRESSÃO (NÓ_12)..... | 61 |
| FIGURA 3.16 - LAYOUT PROGRAMA MODELO DE ESCOAMENTO FOLGAS DE PORTAS..... | 62 |
| FIGURA 3.17 - ESQUEMA DE SIMULAÇÕES..... | 63 |
| FIGURA 4.1 - SIM1_BASE - RPH HORÁRIO AO LONGO DE UM ANO | 64 |
| FIGURA 4.2 - MÉDIA TEMPERATURA EXTERIOR MENSAL VS MÉDIA DE ACH MENSAL | 65 |
| FIGURA 4.3 - MÉDIA DA VELOCIDADE DO VENTO MENSAL VS MÉDIA ACH MENSAL | 65 |
| FIGURA 4.4 - ESQUEMA DE FLUXOS | 66 |
| FIGURA 4.5 - CONDUTAS DE LIGAÇÃO À COBERTURA (LOSANGOS A NEGRITO) | 67 |
| FIGURA 4.6 - SIM1.2_BASE – RPH (H ⁻¹) HORÁRIO AO LONGO DE UM ANO..... | 67 |
| FIGURA 4.7 - MÉDIA DA TEMPERATURA EXTERIOR MENSAL VS MÉDIA DE RPH MENSAL..... | 68 |
| FIGURA 4.8 - MÉDIA DA VELOCIDADE DO VENTO MENSAL VS MÉDIA RPH MENSAL..... | 68 |
| FIGURA 4.9 - MÉDIA MENSAL DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES AO LONGO DE UM ANO..... | 70 |
| FIGURA 4.10 – PROGRAMAÇÃO DAS JANELAS SUPERIORES..... | 71 |
| FIGURA 4.11 - PROGRAMAÇÃO JANELAS INFERIORES COINCIDENTE COM O PERÍODO DE FUNCIONAMENTO DO MUSEU..... | 72 |
| FIGURA 4.12 - MÉDIAS SEMANAIS DE RPH AO LONGO DO ANO..... | 72 |
| FIGURA 4.13 - RPH HORÁRIO AO LONGO DE UM ANO..... | 73 |
| FIGURA 4.14 - MÉDIA SEMANAL DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO INTERIOR DO EDIFÍCIO AO LONGO DE UM ANO | 74 |
| FIGURA 4.15 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO INTERIOR DA SALA D NA SEMANA REPRESENTATIVA DE VERÃO | 75 |
| FIGURA 4.16 - PROGRAMAÇÃO JANELAS INFERIORES | 76 |
| FIGURA 4.17 - PROGRAMAÇÃO JANELAS SUPERIORES..... | 77 |
| FIGURA 4.18 - MÉDIA MENSAL DE RPH AO LONGO DE UM ANO | 77 |
| FIGURA 4.19 - VALORES DE RPH HORÁRIOS AO LONGO DE UM ANO..... | 78 |
| FIGURA 4.20 - MÉDIA SEMANAL DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO INTERIOR DO EDIFÍCIO AO LONGO DE UM ANO | 78 |
| FIGURA 4.21 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO INTERIOR DO SALÃO NA SEMANA REPRESENTATIVA DE VERÃO | 80 |
| FIGURA 4.22 - VALORES MÉDIOS MENSALIS DE RPH AO LONGO DE UM ANO | 81 |
| FIGURA 4.23 - VALORES DE RPH HORÁRIOS AO LONGO DE UM ANO..... | 81 |
| FIGURA 4.24 - MÉDIA SEMANAL DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO INTERIOR DO EDIFÍCIO AO LONGO DE UM ANO | 82 |
| FIGURA 4.25 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO INTERIOR DA SALA 1 AO LONGO DA SEMANA REPRESENTATIVA DE VERÃO | 83 |
| FIGURA 4.26 - IDENTIFICAÇÃO DOS VÃOS ENVIDRAÇADOS EM FUNCIONAMENTO..... | 85 |
| FIGURA 4.27 - VALORES MÉDIOS MENSALIS DE RPH AO LONGO DE UM ANO | 86 |
| FIGURA 4.28 - VALORES DE RPH HORÁRIOS AO LONGO DE UM ANO..... | 86 |
| FIGURA 4.29 - MÉDIAS SEMANAIS DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO INTERIOR DO EDIFÍCIO AO LONGO DE UM ANO | 87 |
| FIGURA 4.30 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO INTERIOR DA SALA D NO DECORRER DA SEMANA REPRESENTATIVA DE OUTONO | 88 |
| FIGURA 4.31 - IDENTIFICAÇÃO DOS CAMINHOS DE FLUXO DISPONÍVEIS PARA CIRCULAÇÃO DE AR..... | 89 |
| FIGURA 4.32 - MÉDIAS MENSALIS DOS VALORES DE RPH AO LONGO DE UM ANO | 90 |
| FIGURA 4.33 - RPH HORÁRIO AO LONGO DE UM ANO DURANTE O PERÍODO DE FECHO DO MUSEU | 91 |
| FIGURA 4.34 - MÉDIAS SEMANAIS DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO INTERIOR DO EDIFÍCIO AO LONGO DE UM ANO | 91 |
| FIGURA 4.35 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO INTERIOR DA SALA D NO DECORRER DA SEMANA REPRESENTATIVA DE VERÃO..... | 93 |
| FIGURA 4.36 - MÉDIAS MENSALIS DOS VALORES DE RPH AO LONGO DOS MESES DE VERÃO | 94 |
| FIGURA 4.37 - RPH HORÁRIO AO LONGO DOS MESES DE VERÃO | 94 |
| FIGURA 4.38 - MÉDIAS SEMANAIS DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO INTERIOR DO EDIFÍCIO AO LONGO DOS MESES DE VERÃO..... | 95 |
| FIGURA 4.39 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO INTERIOR DA SALA D NO DECORRER DA SEMANA 3..... | 96 |
| FIGURA 4.40 - MÉDIAS MENSALIS DOS VALORES DE RPH AO LONGO DO INVERNO | 97 |
| FIGURA 4.41 - MÉDIAS SEMANAIS DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO INTERIOR DO EDIFÍCIO AO LONGO DO INVERNO | 98 |
| FIGURA 4.42 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO INTERIOR DO SALÃO NO DECORRER DA SEMANA 8..... | 100 |
| FIGURA 4.43 - MÉDIAS MENSALIS DOS VALORES DE RPH AO LONGO DE UM ANO..... | 101 |
| FIGURA 4.44 - VALORES DE RPH HORÁRIOS DURANTE O PERÍODO DE FUNCIONAMENTO DO MUSEU AO LONGO DE UM ANO..... | 102 |
| FIGURA 4.45 - MÉDIAS SEMANAIS DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO INTERIOR DO EDIFÍCIO AO LONGO DE UM ANO | 103 |
| FIGURA 4.46 - VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO INTERIOR DA SALA D DURANTE A SEMANA 28 (VERÃO)..... | 105 |
| FIGURA 4.47 - PROGRAMAÇÃO VÃOS ENVIDRAÇADOS..... | 105 |
| FIGURA 4.48 - MÉDIAS MENSALIS DOS VALORES DE ACH AO LONGO DE UM ANO..... | 106 |
| FIGURA 4.49 - VALORES DE RPH HORÁRIOS AO LONGO DE UM ANO..... | 106 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 4.50 - MÉDIAS SEMANAIS DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO INTERIOR DO EDIFÍCIO AO LONGO DE UM ANO .. | 107 |
| FIGURA 4.51 - MÉDIA ANUAL DA CONCENTRAÇÃO AGLOMERADA DE POLUENTES NO INTERIOR DO EDIFÍCIO EM CADA SIMULAÇÃO | 109 |
| FIGURA 4.52 - VARIAÇÃO MÉDIA MENSAL DA CONCENTRAÇÃO DO AGLOMERADO DE POLUENTES NO INTERIOR DO EDIFÍCIO | 110 |
| FIGURA 4.53 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO INTERIOR DA SALA D DURANTE O INVERNO POR SIMULAÇÃO | 111 |
| FIGURA 4.54 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO INTERIOR DA SALA D DURANTE A PRIMAVERA POR SIMULAÇÃO | 112 |
| FIGURA 4.55 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO INTERIOR DA SALA D DURANTE O OUTONO POR SIMULAÇÃO | 112 |
| FIGURA 4.56 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO INTERIOR DA SALA D DURANTE O VERÃO POR SIMULAÇÃO | 113 |
| FIGURA 4.57 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO INTERIOR DO SALÃO DURANTE O INVERNO | 114 |
| FIGURA 4.58 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO INTERIOR DO SALÃO DURANTE A PRIMAVERA | 114 |
| FIGURA 4.59 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO INTERIOR DO SALÃO DURANTE O VERÃO | 115 |
| FIGURA 4.60 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO INTERIOR DO SALÃO DURANTE O OUTONO..... | 115 |
| FIGURA 0.1 - MODELO DE TESTE TIRAGEM TÉRMICA..... | 125 |
| FIGURA 0.2 - ESQUEMA UTILIZADO PARA O CÁLCULO ANALÍTICO [55] | 126 |
| FIGURA 0.3 - MODELO TESTE EFEITO DO VENTO | 127 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| TABELA 2.1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA E VOLUMETRIA DO AR ATMOSFÉRICO SECO. (ADAPTADO DE:[3])..... | 3 |
| TABELA 2.2 - DIRETRIZES PARA A QUALIDADE DO AR EM $\mu\text{G}/\text{M}^3$. (ADAPTADO DE:[20])..... | 8 |
| TABELA 2.3 - COEFICIENTES DE TERRENO PARA A VELOCIDADE DO VENTO. (ADAPTADO DE: [35])..... | 23 |
| TABELA 2.4 – DISTRIBUIÇÃO DA POPULAÇÃO MUNDIAL. (ADAPTADO DE: [99])..... | 28 |
| TABELA 2.5 - TIPO DE ESTAÇÕES, OBJETIVOS DE MONITORIZAÇÃO E RESPECTIVOS POLUENTES A ANALISAR. (ADAPTADO DE:[101]) | 30 |
| TABELA 2.6 - ÍNDICE DA QUALIDADE DO AR $\mu\text{G}/\text{M}^3$. (ADAPTADO DE: [104]) | 32 |
| TABELA 2.7 - VALORES LIMITE PARA POLUENTES AÉREOS ($\mu\text{G}/\text{M}^3$). (ADAPTADO DE: [83])..... | 41 |
| TABELA 2.8 - TAXAS HORÁRIAS MÍNIMAS DE VENTILAÇÃO. (ADAPTADO DE: [83])..... | 42 |
| TABELA 2.9 - SUGESTÕES DE NÍVEIS DA QUALIDADE DO AR. (ADAPTADO DE PD CR 1752: [86]) | 45 |
| TABELA 2.10 - DESCRIÇÃO DAS QUATRO CATEGORIAS CONTEMPLADAS NA NORMA EN 15251. (ADAPTADO DE: [87]) | 47 |
| TABELA 3.1 - CONCENTRAÇÕES MÉDIAS MENSAIS DE POLUENTES | 56 |
| TABELA 3.2 - PARÂMETROS DE ENTRADA REFERENTES AOS POLUENTES EM ESTUDO | 57 |
| TABELA 4.1 - MÉDIA MENSAL DE TEMPERATURA EXTERIOR, VELOCIDADE DO VENTO E RPH | 66 |
| TABELA 4.2 - MÉDIA MENSAL DE TEMPERATURA EXTERIOR, VELOCIDADE DO VENTO E RPH APÓS INTRODUÇÃO DAS CONDUITAS..... | 69 |
| TABELA 4.3 - TAXAS DE VENTILAÇÃO RECOMENDADAS SEGUNDO A EN 15251 PARA IGREJAS E GALERIAS. (ADAPTADO DE:[87]) | 71 |
| TABELA 4.4 - PERCENTAGEM DE VALORES DE RPH PARA CADA CATEGORIA DA NORMA EN 15251 [%] | 73 |
| TABELA 4.5 - COMPARAÇÃO SIM1.3_BASE E SIM_2.1 RELATIVAMENTE A CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES $\mu\text{G}/\text{M}^3$ | 73 |
| TABELA 4.6 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES INTERIOR VS ÍNDICE DA QUALIDADE DO AR $\mu\text{G}/\text{M}^3$ | 74 |
| TABELA 4.7 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES INTERIOR VS SUGESTÃO LIMITE ASHRAE 2015 ($\mu\text{G}/\text{M}^3$)..... | 76 |
| TABELA 4.8 - PERCENTAGEM DE VALORES DE RPH PARA CADA CATEGORIA DA NORMA EN 15251 | 78 |
| TABELA 4.9 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO AMBIENTE INTERIOR VS ÍNDICE DA QUALIDADE DO AR $\mu\text{G}/\text{M}^3$ | 79 |
| TABELA 4.10 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES INTERIOR VS SUGESTÃO DE VALORES LIMITE ASHRAE 2015 ($\mu\text{G}/\text{M}^3$)..... | 80 |
| TABELA 4.11 - PERCENTAGEM DE VALORES DE RPH PARA CADA CATEGORIA DA NORMA EN 15251 | 82 |
| TABELA 4.12 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO AMBIENTE INTERIOR VS ÍNDICE DA QUALIDADE DO AR ($\mu\text{G}/\text{M}^3$) | 83 |
| TABELA 4.13 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO AMBIENTE INTERIOR VS ASHRAE 2015 ($\mu\text{G}/\text{M}^3$) | 84 |
| TABELA 4.14 - PERCENTAGEM DE VALORES DE RPH PARA CADA CATEGORIA DA NORMA EN 15251 | 86 |
| TABELA 4.15 - COMPARAÇÃO SIM_2.2.2 E SIM_2.3.1 RELATIVAMENTE À CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES ($\mu\text{G}/\text{M}^3$) | 87 |
| TABELA 4.16 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO AMBIENTE INTERIOR VS ÍNDICE DA QUALIDADE DO AR ($\mu\text{G}/\text{M}^3$) | 88 |
| TABELA 4.17 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO AMBIENTE INTERIOR VS ASHRAE 2015 ($\mu\text{G}/\text{M}^3$) | 89 |
| TABELA 4.18 - PERCENTAGEM DE VALORES DE RPH EM CADA CATEGORIA DA NORMA EN 15251 | 91 |
| TABELA 4.19 - COMPARAÇÃO SIM_2.2.2 E SIM_2.3.1 RELATIVAMENTE À CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES ($\mu\text{G}/\text{M}^3$) | 92 |
| TABELA 4.20 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO AMBIENTE INTERIOR VS ÍNDICE DA QUALIDADE DO AR ($\mu\text{G}/\text{M}^3$) | 92 |
| TABELA 4.21 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO AMBIENTE INTERIOR VS ASHRAE 2015 ($\mu\text{G}/\text{M}^3$) | 93 |
| TABELA 4.22 - PERCENTAGEM DE VALORES DE RPH PARA CADA CATEGORIA DA NORMA EN 15251 | 95 |
| TABELA 4.23 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO AMBIENTE INTERIOR VS ÍNDICE DA QUALIDADE DO AR ($\mu\text{G}/\text{M}^3$) | 96 |
| TABELA 4.24 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO AMBIENTE INTERIOR VS ASHRAE 2015 ($\mu\text{G}/\text{M}^3$) | 97 |
| TABELA 4.25 - PERCENTAGEM DE VALORES DE RPH PARA CADA CATEGORIA DA NORMA EN 15251 | 98 |
| TABELA 4.26 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO AMBIENTE INTERIOR VS ÍNDICE DA QUALIDADE DO AR ($\mu\text{G}/\text{M}^3$) | 99 |
| TABELA 4.27 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO AMBIENTE INTERIOR VS ASHRAE 2015 ($\mu\text{G}/\text{M}^3$) | 99 |
| TABELA 4.28 - PERCENTAGEM DE VALORES DE RPH PARA CADA CATEGORIA DA NORMA EN 15251 | 102 |
| TABELA 4.29 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO AMBIENTE INTERIOR VS ÍNDICE DA QUALIDADE DO AR ($\mu\text{G}/\text{M}^3$) | 104 |
| TABELA 4.30 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO AMBIENTE INTERIOR VS ASHRAE 2015 ($\mu\text{G}/\text{M}^3$) | 104 |
| TABELA 4.31 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO AMBIENTE INTERIOR VS ÍNDICE DA QUALIDADE DO AR ($\mu\text{G}/\text{M}^3$) | 107 |

| | |
|---|-----|
| TABELA 4.32 - CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO AMBIENTE INTERIOR VS ASHRAE 2015 ($\mu\text{G}/\text{M}^3$) | 108 |
| TABELA 4.33 - MÉDIAS MENSAS DO AGLOMERADO DE POLUENTES NO INTERIOR DO EDIFÍCIO POR CADA SIMULAÇÃO ($\mu\text{G}/\text{M}^3$) | 110 |

SIGLAS

| | |
|--------------------|---|
| ACH | Air change per hour |
| APA | Agência Portuguesa do Ambiente |
| ASHRAE | American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers |
| CFD | Computational Fluid Dynamics |
| CIBSE | Chartered Institution of Building Services Engineers |
| COVs | Compostos Orgânicos Voláteis |
| Cp | Coeficiente de Pressão |
| HR | Humidade Relativa |
| INE | Instituto Nacional de Estatística |
| IPMA | Instituto Português do Mar e da Atmosfera |
| NIOSH | National Institute for Occupational Safety and Health |
| NOx | Óxidos de Azoto |
| O3 | Ozono |
| OCDE | Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico |
| OMS | Organização Mundial da Saúde |
| PM | Material Particulado |
| QAI | Qualidade do Ar Interior |
| RLVT | Região de Lisboa e Vale do Tejo |
| Rph | Renovações por hora |
| SED | Síndrome dos Edifícios Doentes |
| Sim1_Base | Primeira abordagem ao programa |
| Sim1.2_Base | Melhorias aplicadas à Sim1_Base |

| | |
|-----------------------|---|
| Sim_1.3_Base | Introdução do ficheiro de poluentes |
| Sim_2.1 | Ventilação sem recorrer a tiragem térmica |
| Sim_2.2 | Ventilação unilateral |
| Sim_2.3 | Ventilação cruzada |
| Sim_2.4 | Vãos envidraçados fechados no inverno |
| Sim_2.5 | Ventilação noturna |
| SO_x | Compostos de Enxofre |
| WHO | World Health Organization |

1.1. Motivação e Enquadramento do Tema

A poluição atmosférica urbana deverá tornar-se a primeira causa ambiental de mortalidade em todo o mundo até 2050, de acordo com a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE) [1].

A degradação da qualidade do ar exterior eleva a necessidade avaliar cuidadosamente a implementação dos sistemas de ventilação visto que nas sociedades contemporâneas cerca de 60% a 90% do tempo é passado em espaços fechados [2].

A ventilação natural surge como uma alternativa sustentável aos sistemas de ventilação mecânica, contribuindo para a redução dos consumos energéticos dos edifícios. No entanto, a implementação de estratégias de ventilação natural exige um planeamento rigoroso dada a necessidade de contabilizar diferentes variáveis tais como: orientação, geometria e localização do edifício. A eficácia da ventilação natural enfrenta desafios significativos em centros urbanos, onde a poluição atmosférica é uma preocupação crescente. Estudos indicam que, em zonas com concentrações elevadas de poluentes atmosféricos, a ventilação natural pode contribuir para a exposição dos ocupantes dos edifícios a concentrações nocivas para a sua saúde. Analisar a necessidade de sistemas mistos que recorram a ventilação mecânica em complemento da ventilação natural é imperativo.

Posto isto, a análise detalhada da contribuição de cada estratégia de ventilação para a introdução de poluentes exteriores no ambiente interior torna-se imperativa.

1.2. Objetivos da Investigação

A presente dissertação pretende de estudar o impacto da concentração de poluentes exteriores na qualidade do ar interior (QAI), não apenas no que diz respeito à saúde dos ocupantes, mas também no impacto no património histórico que é preservado no interior de alguns edifícios.

Os objetivos principais da presente investigação são:

- Compreender e quantificar o impacto da concentração de poluentes exteriores na qualidade do ar interior ao nível da saúde dos ocupantes e preservação de artefactos.
- Perceber a diferença resultante da adoção de distintas estratégias e/ou mecanismos de ventilação natural.
- Determinar quais os poluentes que mais impactam a qualidade do ar interior em Lisboa.

1.3. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação é dividida em cinco capítulos tal como se especifica de seguida.

No capítulo 1, Introdução, é realizado o enquadramento do tema em análise, contextualizando-o e delineando os seus propósitos. Além disso, é realizada uma explicação da motivação que leva à necessidade da escrita da presente dissertação, passando pela apresentação dos objetivos e estrutura do trabalho realizado.

No capítulo 2, Revisão de Literatura, apresenta-se o enquadramento teórico recorrendo a uma revisão da literatura disponível acerca dos temas em estudo. O capítulo 2 divide-se em quatro subcapítulos para uma abordagem criteriosa e concisa dos temas envolvidos, sendo estes: qualidade do ar interior, ventilação natural, poluentes aéreos e enquadramento legal.

O capítulo 3, Metodologia, aborda todos os aspetos fundamentais à execução experimental que se pretende realizar. Inicia-se com uma caracterização do caso de estudo e clima de Lisboa realçando fatores importantes para a análise executada. De seguida, procede-se a uma introdução da ferramenta de análise utilizada (*CONTAM*), passando pelos parâmetros de entrada tais como, ficheiro climático, fontes e modelos de poluentes, geometria do modelo introduzido e caminhos de fluxo.

O capítulo 4, Análise de Resultados, apresenta, descreve e analisa os resultados obtidos na vertente de modelação da presente dissertação.

Em conclusão, o capítulo 5, Conclusões e Recomendações Futuras, encerra o trabalho realizado com a apresentação de conclusões sobre o caso de estudo. São ainda expostas as suas contribuições para a comunidade científica e, por fim, sugestões e recomendações para trabalhos futuros no seguimento do presente tema.

Ventilação natural e QAI em edifícios

2.1 Qualidade do Ar Interior

A definição de qualidade do ar é um conceito subjetivo na medida em que cada utilizador pode ter uma sensibilidade diferente. De acordo com a ASHRAE 62.1, a definição de ar interior aceitável é a seguinte: *“ar no qual não existem contaminantes conhecidos em concentrações prejudiciais, conforme determinado pelas autoridades competentes, e com o qual a grande maioria (80% ou mais) das pessoas expostas não expressa insatisfação”*[3]. A definição do que é ar puro é essencial para que se possa quantificar a boa ou má qualidade do ar. Tipicamente, ar puro é associado ao ar atmosférico seco que é possível encontrar em áreas rurais longe de fontes poluentes. A sua composição química pode ser consultada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Composição química e volumetria do ar atmosférico seco. (Adaptado de:[3])

| Substância | Concentração (ppm) |
|-----------------------|--------------------|
| Nitrogénio | 780,840 |
| Oxigénio | 209,460 |
| Argon | 9,340 |
| Dióxido de Carbono | 330 |
| Neon | 18 |
| Hélio | 5.2 |
| Metano | 1.2 |
| Cripton | 0.5 |
| Xenon | 0.08 |
| Dióxido de Nitrogénio | 0.02 |
| Ozono | 0.01-0.04 |

Tendo por base esta definição de ar puro, é possível concluir que a qualidade do ar se refere ao grau de poluição de uma determinada massa de ar quando comparada à composição acima referida [4].

Os poluentes que comprometem a QAI são provenientes de uma vasta diversidade de fontes emissoras podendo ser divididos em três grandes categorias: físicos, químicos e biológicos [5]. As concentrações de determinados poluentes por si só podem não ser significativas, mas a sua conjugação e interação com outros compostos presentes no ar inalado pode percutir efeitos negativos para a saúde da população tais como: asma, rinite alérgica, infecções respiratórias entre outros [6, 7, 8].

Os poluentes atmosféricos são definidos como substâncias que podem ter efeitos adversos na saúde da população ou no ambiente. O seu grau de impacto está relacionado com o tipo e concentração a que os humanos estão expostos. A exposição é uma consequência da localização, das características das fontes emissoras e das condições meteorológicas da região em causa.

2.1.1 Conforto e saúde dos ocupantes

A QAI pode ser avaliada pelos seres humanos de acordo com a combinação do cheiro e percepção de irritação obtida através das mucosas nasais e oculares [9]. O conforto humano pode ser condicionado pela exposição a gases e odores emitidos pelos ocupantes, pelo próprio edifício e sistemas mecânicos de climatização [10].

A ameaça que a poluição atmosférica representa para a saúde humana adquiriu destaque ao longo dos séculos, derivado de incidentes ocorridos em redor do planeta. No decorrer do séc. XX, ocorreram vários desastres: *“The Meuse Valley in 1930; Donora, Pennsylvania, in 1948; and London in 1952”*. O desastre *“the Meuse Valley”* foi um dos primeiros eventos documentados de poluição atmosférica causando mortes em larga escala. O incidente ocorreu na região industrial Meuse Valley, na Bélgica, tendo a combustão do carvão sido a principal fonte de poluentes. Donora, na Pensilvânia, em 1948, é outro exemplo marcante de poluição extrema, tendo ocorrido devido a uma combinação de emissões industriais e condições climáticas que impediram a dispersão dos poluentes (inversão térmica). Este desastre é considerado um dos principais impulsionadores da regulamentação ambiental no Estados Unidos, tendo sido um precursor da *“Clean Air Act”*. A era moderna de investigação sobre a poluição atmosférica começa com o nevoeiro de Londres em 1952 [11].

Os primeiros estudos e medições relativos à QAI remontam à mesma época do início da investigação sobre as condições da qualidade do ar ambiente exterior. As principais causas de degradação da QAI são separadas em seis categorias, de acordo com a NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health), nomeadamente, ventilação inadequada, poluentes exteriores e interiores, matéria microbiana e poluentes provenientes de materiais de construção [12]. A Figura 2.1 ilustra a divisão descrita [13].

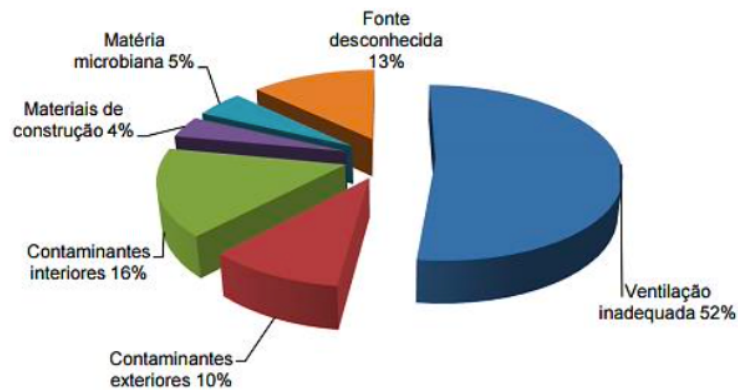


Figura 2.1 - Principais fontes de poluentes do ar interior [13]

O impacto dos odores na percepção da QAI foi investigado pela primeira vez por Yaglou em 1936, com recurso a estudos em câmaras ventiladas com ar fresco exterior em que os ocupantes avaliavam a QAI consoante a sua percepção. O estudo recorreu a diferentes escalas de avaliação nomeadamente uma escala de odor [11]. Os testes foram replicados nas décadas de oitenta e noventa, recorrendo a condições mais controladas, modernas e com recurso a uma maior amostra de voluntários. Estes fatores permitiram conclusões mais assertivas e confiáveis. Estudos realizados na Europa [14] e nos EUA [15] mostraram fortes correlações permitindo a validação dos métodos e resultados obtidos pelos diferentes laboratórios. Estes resultados são a base de documentos internacionais, tais como a norma ASHRAE Standard 62 [16], elaborada pela *American Society of Heating, Refrigerating and Air Condition Engineers (ASHRAE)* em 1973, que é uma das principais referências em relação à QAI, e a norma europeia EN 16798-1 [17]. A partir das conclusões registadas foi possível estabelecer uma relação entre as concentrações de gases como o CO₂ e o desconforto dos ocupantes, que comprovou ser um bom indicador para avaliar a QAI.

Fanger em 1988 introduziu as unidades olf e decipol, que têm como objetivo avaliar a QAI com base na percentagem de ocupantes insatisfeitos em função do seu testemunho. A unidade olf pretende quantificar as fontes de poluição (1 olf corresponde à emissão standart de um humano), por outro lado, a unidade decipol pretende quantificar a concentração de poluição sentida pelos ocupantes.

A análise dos resultados obtidos culmina em duas equações (Equações 2.1 e 2.2), enunciadas de seguida [18]:

$$PD = 395 \times e^{(-1,83 \times (\frac{q}{3,6})^{0,25})}, \quad q \geq 1,15 \text{ m}^3/\text{h.olf} \quad (2.1)$$

$$PD = 100, \quad q \leq 1,15 \text{ m}^3/\text{h.olf} \quad (2.2)$$

Onde PD corresponde à percentagem de pessoas insatisfeitas e q ao caudal de ar ($\text{m}^3/\text{h.olf}$).

A Figura 2.2 pretende evidenciar a relação entre a percentagem de pessoas insatisfeitas com a qualidade do ar interior e a taxa de ventilação. As duas equações (2.1 e 2.2) representam a trajetória da curva a negrito evidenciando que quanto maior a taxa de ventilação menor a percentagem de pessoas insatisfeitas com a qualidade do ar.

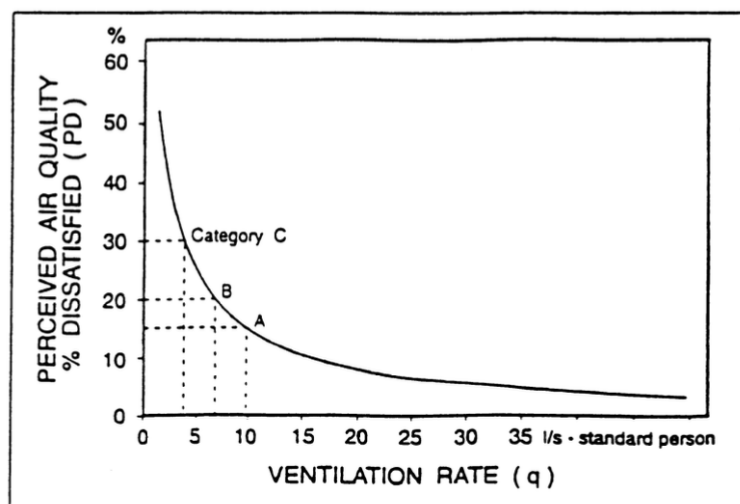


Figura 2.2 - Relação entre a percentagem de pessoas insatisfeitas com a QAI e taxa de ventilação [8]

A QAI é influenciada por uma vasta diversidade de fatores que comprometem a saúde e o bem-estar dos ocupantes e, por esta razão, é necessária a caracterização de problemas interiores relacionados com a qualidade do ar. Além de estabelecer níveis de conforto elevados, a QAI deve garantir um ambiente interior saudável para todos os ocupantes. A principal preocupação da população é dirigida para os impactos da poluição exterior na saúde. Diversos estudos sugerem que a maior parte da população considera que os riscos da má qualidade do ar exterior são substancialmente mais elevados quando comparados com os riscos da contaminação do ar interior dos edifícios [19]. O aumento da exposição a poluentes aéreos em espaços interiores ao longo dos anos é uma consequência direta das mudanças do estilo de vida das sociedades modernas. Cerca de 90% do tempo é passado em espaços interiores, sejam estes: habitações, espaços de trabalho e transportes [20].

O estudo “*Harvard Six-Cities*”, investigação de referência sobre a poluição atmosférica exterior, teve como objetivo estabelecer a ligação entre as partículas finas presentes na composição do ar atmosférico exterior e a redução da esperança de vida da população em seis cidades americanas, tendo chegado à conclusão que numa cidade mais poluída, a poluição tinha 26% maior probabilidade de morrer do que numa cidade menos poluída [21].

Na década de setenta, a crise energética mostrou-se um problema bastante presente na sociedade. Assim, no sentido de promover a melhoria do desempenho térmico, energético e das condições de conforto das habitações, implementaram-se medidas para elevar a presença e quantidade de isolamentos, tanto a nível térmico como acústico. Estas melhorias não tiveram

em conta questões relacionadas com a salubridade dos espaços que estão diretamente dependentes da ventilação dos edifícios [22, 23]. As taxas de renovação horárias de ar (trocas de massas de ar entre o interior e exterior de um qualquer espaço) acabaram por ser cada vez mais reduzidas, contribuindo para um aumento substancial da concentração de poluentes nos espaços interiores [24]. Estas alterações, conjugadas com a maior permanência da população em espaços fechados, aumentam fortemente o risco de exposição prolongada aos poluentes do ar interior, apresentando efeitos negativos para a saúde humana e para o edifício. A reduzida renovação de ar conjugada com pouco ou nenhum isolamento térmico na envolvente do edifício conduz à ocorrência de determinadas anomalias, nomeadamente condensações superficiais [25, 26, 27].

Os sintomas e doenças relacionados com a QAI foram classificados pela Organização Mundial da Saúde (OMS) como a Síndrome dos Edifícios Doentes (SED) em 1973/74. A SED pode ser causada pela elevada concentração de poluentes no interior dos edifícios apresentando fortes ligações a estratégias de ventilação ineficientes. O estudo de casos da SED forneceu uma visão importante sobre os problemas enfrentados pela procura da relação entre a poluição do ar interior e a saúde dos ocupantes.

Os efeitos da qualidade do ar na saúde da população são evidentes e reconhecidos mundialmente. Segundo a OMS *“a qualidade do ar é um requisito básico para a saúde humana e o seu bem-estar”* [28], ao nível da comunidade europeia *“a saúde humana e o bem-estar estão intimamente ligados à qualidade ambiental”* [29]. A visão nacional afirma que *“a gestão do ar visa preservar e melhorar a respetiva qualidade no meio ambiente, garantir a sua boa qualidade no interior dos edifícios e reduzir e prevenir as disfunções ambientais, de forma a minimizar os efeitos adversos para a saúde humana e para o ambiente”* [30].

Em 2005, a OMS, desenvolveu diretrizes específicas para a QAI tendo referenciado a matéria particulada em suspensão (PM_{10} e $PM_{2,5}$). Anos depois, em 2009, publica *“WHO guidelines for indoor air quality: dampness and mould”* com o objetivo de estabelecer um resumo sobre as condições que determinam a presença de microrganismos e medidas para controlar o seu crescimento em espaços interiores [31]. Em 2010 lança o documento *“WHO Guidelines for Indoor Air Quality – Selected Pollutants”* onde apresenta os valores a ser guiados para dez poluentes presentes no ar interior [32]. Finalmente, em 2021, foi publicado o documento que conjuga todos os poluentes em análise na presente dissertação pela sua importância a nível mundial *“WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide”* [33]. Os seus principais objetivos são fornecer recomendações baseadas em dados concretos e resultados críticos para a saúde da população. A Tabela 2.2 enuncia as diretrizes em relação à exposição a determinados poluentes delineadas no documento.

Tabela 2.2 - Diretrizes para a qualidade do ar em $\mu\text{g}/\text{m}^3$. (Adaptado de:[20])

| Poluente | Tempo de Exposição | Nível AGQ |
|--------------------|--------------------|-----------|
| PM2.5 | Anual | 5 |
| | 24h | 15 |
| PM10 | Anual | 15 |
| | 24h | 45 |
| Ozono | 8h | 100 |
| Dióxido de Azoto | Anual | 10 |
| | 24h | 25 |
| Dióxido de Enxofre | 24h | 40 |

A Agência Ambiental dos Estados Unidos (US-EPA), em 2009, classificou a poluição do ar interior entre um dos principais riscos para a saúde pública.

Em 2030, a poluição será uma das principais causas de morte associada a questões ambientais de acordo com o relatório disponibilizado pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE), contabilizando cerca de 2,3 milhões de mortes. A Figura 2.3 exhibe as projeções de mortes prematuras globais relacionadas com riscos ambientais.

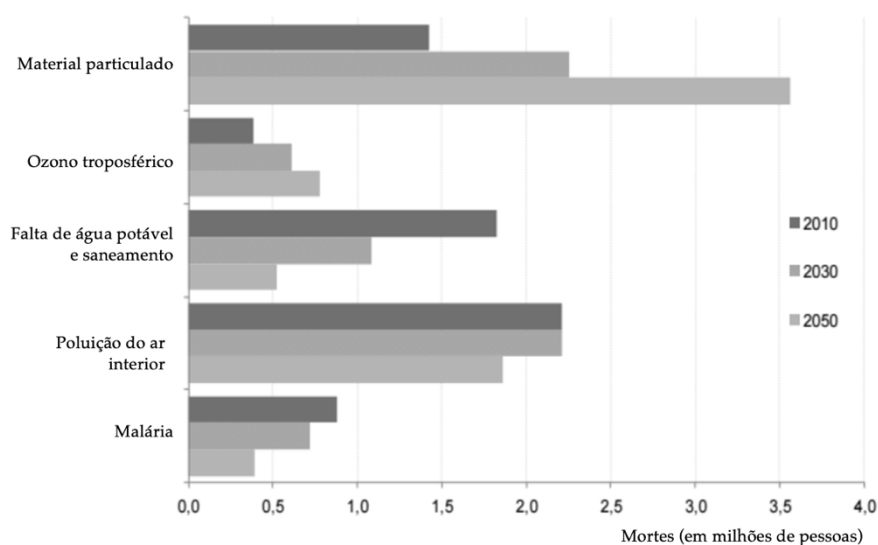


Figura 2.3 - Mortes prematuras globais relacionadas com riscos ambientais. (Adaptado de: [1])

A Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE) apresenta uma visão em linha com a Agência Ambiental dos Estados Unidos (US-EPA) afirmando que *“a poluição atmosférica urbana deverá tornar-se a primeira causa ambiental de mortalidade em todo o mundo até 2050, à frente da poluição da água e da falta de saneamento”*.

A prevenção e combate às consequências da poluição do ar representam um desafio para as sociedades contemporâneas, especialmente ao nível da Engenharia Civil, que contacta diretamente com as questões técnicas dos edifícios e espaços interiores. Trata-se de um

problema que exige cooperação global, visando alcançar soluções concretas e abrangentes que englobem a otimização de infraestruturas, o planeamento urbano, alterações climáticas, desenvolvimento tecnológico e mudanças comportamentais no modo de vida da população.

2.1.2 Impacto material

O património histórico é um aspeto fundamental das sociedades quer seja a nível cultural e religioso como económico. Gerir este ativo é uma tarefa complexa que reflete a vasta variedade de história, arte e cultura em redor do planeta. A diversidade de monumentos e peças de arte é caracterizada pela larga amplitude de idades que variam ao longo de séculos, localização em ambientes radicalmente díspares e heterogeneidade de materiais utilizados.

Fatores combinados como a temperatura, humidade relativa e agentes poluentes aéreos constituem problemas para a conservação do património.

A poluição atmosférica é uma das principais ameaças para todo o conjunto de monumentos e peças de arte que são preservados como parte do espólio de elevada importância nacional dos países. O perigo associado advém de duas fontes principais: gases que conduzem ao aumento da corrosividade do ar e deposição de partículas na superfície dos materiais [5].

Os processos de degradação podem ser categorizados em três mecanismos de atuação, podendo atuar em simultâneo ou numa determinada sequência temporal:

- **Degradação mecânica**

A degradação mecânica ocorre maioritariamente devido à aplicação de forças exteriores a um determinado objeto. Impactos, movimentos e aplicação de cargas conduzem a tensões nos materiais originando conseqüentemente alteração nas suas dimensões.

Considere-se o exemplo da madeira: para pequenas tensões, a relação tensão/deformação apresenta um comportamento linear, reagindo elasticamente, ou seja, após a aplicação de uma carga não apresenta deformação plástica. Se o aumento de tensão for superior ao seu ponto de cedência a madeira entra em deformação plástica, não voltando ao estado inicial após o término da aplicação de tensões.

A Figura 2.4 permite a observação do ponto de cedência de uma amostra de madeira, bem como do seu ponto de rotura[34]. Neste ensaio as cargas foram aplicadas na direção radial e tangencial.

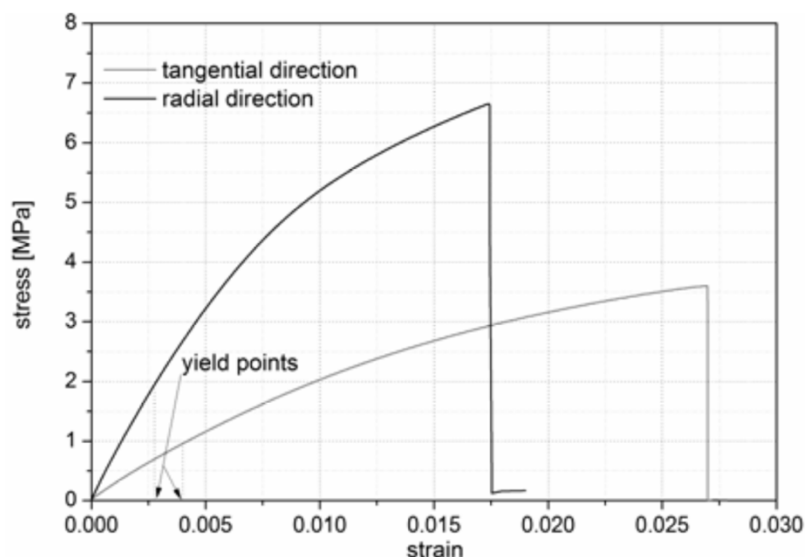


Figura 2.4 - Ponto de cedência para uma amostra de madeira [34]

A degradação mecânica pode também ser causada devido a deformações geradas por forças internas como, por exemplo, variações de temperatura e humidade relativa (HR).

A grande maioria dos materiais apresenta capacidades higroscópicas. Quando ocorre um aumento de HR o objeto ou material tende a expandir. Por outro lado, se a tendência for de decréscimo, retrai. Dois materiais combinados que apresentem coeficientes de expansibilidade diferentes, em ciclos constantes de expansão/retração, geram tensões internas que podem levar à rotura dos materiais.

De acordo com Erhardt, o impacto das deformações está dependente dos seguintes fatores [35]:

- Resposta dimensional de um material a variações de HR;
- Alteração da rigidez do material;
- Grau de restrição a movimentos do material.

A variedade dos materiais utilizados em coleções de museus é infindável, mas é imperativo o conhecimento exato de cada material específico para prever a sua degradação mecânica. Ao longo dos anos foram estudados vários materiais com o objetivo de perceber o seu comportamento quando expostos a determinadas condições ambientais. A resposta de camadas de uma pintura em superfícies de madeira foi estudada por Mecklenburg, de forma individual, avaliando o seu comportamento variando as condições de humidade relativa ambiente [36].

As alterações da HR são extremamente importantes para que seja possível perceber o comportamento dos materiais coligados numa só peça.

A relação entre temperatura e humidade relativa no choupo pode ser observada na Figura 2.5. O gráfico traduz a resposta obtida por parte do material aquando de uma alteração

gradual da HR ambiente. Para cada estado de humidade relativa inicial e final, podem ser avaliados os danos resultantes destas oscilações. As variações na zona elástica do material (entre as curvas para uma tensão de cedência de 0,004) não proporcionam degradação considerável. Por outro lado, as variações na região de falha conduzem a fissuras. Entre estas duas regiões, ocorre deformação plástica que pode originar a rotura após ciclos contínuos de variação da HR.

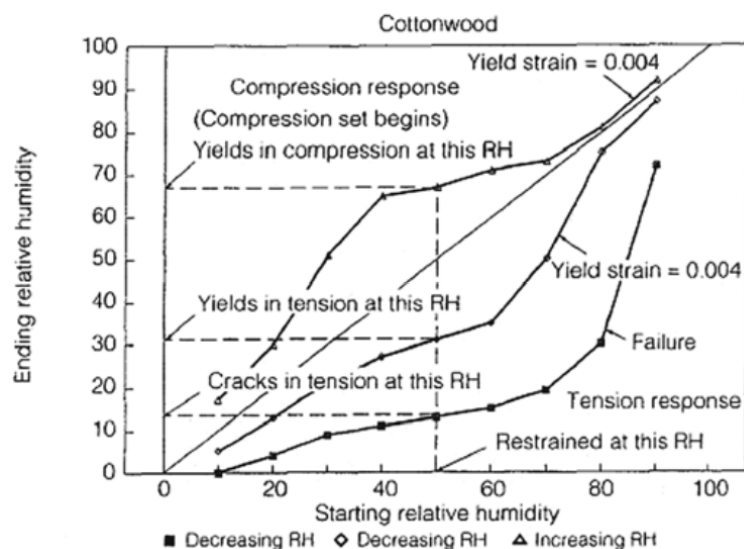


Figura 2.5 - Resposta do choupo a variações de humidade relativa [36]

Martens desenvolveu uma ferramenta útil com o objetivo de analisar os efeitos de alterações microclimáticas nos materiais. Consiste na avaliação de oscilações nos valores de humidade relativa que podem impor deformações em determinados objetos, se as tensões impostas pelas variações de HR forem superiores à tensão de cedência dos materiais podem ocorrer deformações e/ou fissuras [37].

- **Degradação Química**

Os materiais são atacados quimicamente por compostos reativos presentes no ambiente circundante em que se inserem. Os danos podem ser iniciados ou acelerados por fatores físicos como temperatura, água e radiação. A quantidade de água nos materiais aumenta à medida que as condições de humidade relativa ambiente também aumentam sendo este um fator central para a realização de processos químicos e posterior degradação de materiais [38].

Os métodos para avaliação da velocidade de degradação de objetos têm sido alvo de estudo ao longo de décadas. O principal problema na avaliação desta problemática prende-se dificuldade em efetuar medições de taxas de deterioração num período razoável. O processo de envelhecimento dos materiais tende a ser acelerado pelos investigadores, o que pode comprometer as suas propriedades, influenciando os resultados obtidos.

Zou, com o objetivo de resolver este problema analisou em detalhe o processo de degradação da celulose, concluindo que apresenta um comportamento proporcional à equação de Arrhenius [39]:

$$k = A \times e^{\frac{-E_a}{R \times T}} \quad (2.3)$$

Em que:

- k – Constante de velocidade (1/s)
- A – Constante taxa de frequência (1/s)
- E_a – Energia de Ativação (J/mol)
- T – Temperatura (K)
- R – Constante Universal de Gases (8,314 J/mol)

No entanto, a equação de Arrhenius não é precisa para baixos valores de humidade relativa. Michalski corrigiu este fator aplicando a lei da potência, desenvolvendo o conceito de multiplicador do tempo de vida (Equação 2.4), que pode ser aplicada à generalidade dos objetos presentes num museu.

$$LM_x = \left(\frac{50\%}{LM_x}\right)^{1,3} \times e^{\frac{E_a}{R} \times \left(\frac{1}{T_x} - \frac{1}{293}\right)} \quad (2.4)$$

Em que:

- LM_x – Multiplicador do tempo de vida no ponto x (-)
- E_a – Energia de ativação (J/mol)
- R – Constante Universal de Gases (8,314 J/mol)
- T_x – Temperatura no ponto x (K)
- RH_x – Humidade Relativa no ponto x (%)

• Degradação Biológica

A proliferação de organismos biológicos é a causa de variados processos de degradação de obras de arte em museus.

Em primeiro lugar, é importante esclarecer quais as condições ideais para o crescimento destes organismos e só após esta compreensão atuar com medidas de precaução eficazes. Para que seja possível o desenvolvimento biológico de fungos são necessárias condições específicas no que diz respeito a temperatura, humidade relativa, condições microclimáticas e presença de um substrato nutritivo.

A Figura 2.6 apresenta um conjunto de quatro gráficos que permitem determinar se o crescimento fúngico pode ocorrer e, caso seja possível, qual a sua velocidade [40]. As condições adotadas são os parâmetros temperatura e humidade relativa.

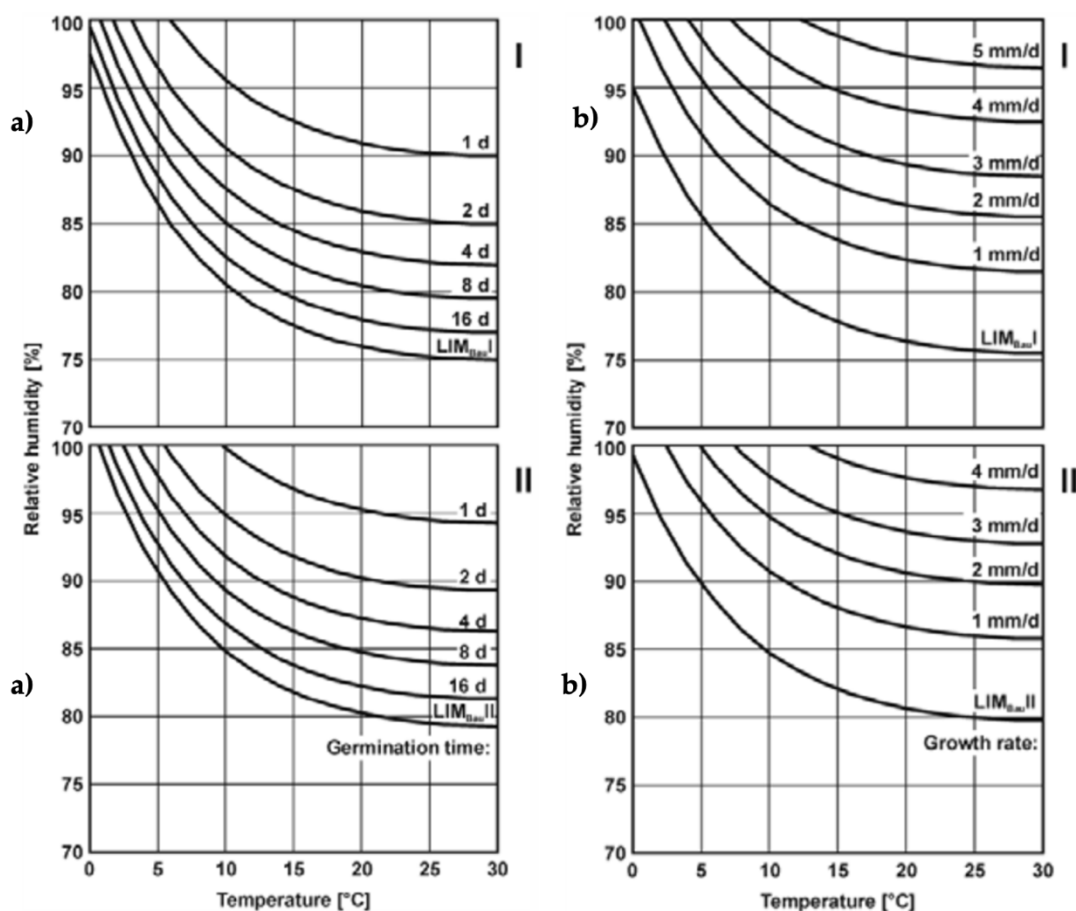


Figura 2.6 - Condições favoráveis ao crescimento de fungos [40]

As isolinhas dos dois gráficos a) representam o tempo de germinação dos fungos em dias (tempo necessário para ativação dos esporos); a curva limite é indicada como LIM. Os dois gráficos b) apresentam as taxas de crescimento, traduzindo uma determinada velocidade de crescimento perante condições específicas de temperatura e humidade relativa. É importante ressaltar que os gráficos I são válidos para o desenvolvimento de fungos num suporte que é biologicamente reciclável, atuando diretamente como substrato nutritivo. Por outro lado, os gráficos II, correspondem a um suporte que não é biologicamente reciclável, mas que apresenta uma estrutura porosa permitindo a deposição de partículas que atuam como nutrientes.

Michalski concluiu que a HR num espaço interior igual ou inferior a 60% impede o crescimento de material fungicida [41].

Scott estudou o crescimento de fungos em regiões tropicais, constatando que estes não se desenvolvem com a frequência esperada, uma vez que, em regiões tropicais as superfícies

não estão suficientemente frias para que existam condições ideais de HR para o desenvolvimento destes organismos [42].

Na norma ASHRAE 2007, é possível encontrar relações que correlacionam o crescimento fúngico com valores de HR para diferentes materiais biologicamente degradáveis [43].

2.2 Ventilação Natural

Neste capítulo, pretende-se explicar os mecanismos e estratégias referentes à ventilação natural, de forma a relacionar a introdução de poluentes exteriores no interior dos edifícios.

Apesar da dificuldade de conceber e investigar sistemas baseados em ventilação natural, esta temática tem ganho destaque devido ao desenvolvimento de edifícios com baixas emissões de carbono associadas [44].

A ventilação pode ser definida pelo processo de admissão de ar exterior que é consequentemente fornecido aos ocupantes e pelo qual as concentrações de poluentes potencialmente nocivos para a saúde são diluídas e removidas dos espaços [45].

Os dois principais objetivos da ventilação são:

- **Proporcionar altos parâmetros de QAI**, através da remoção de poluentes transportados pelo ar, odores, excesso de humidade, partículas em suspensão e quaisquer outras substâncias nocivas para os ocupantes, tais como: vírus e bactérias.
- **Garantir conforto térmico**, com o auxílio de sistemas de aquecimento ou sistemas de ar-condicionado a ventilação pode ser utilizada por forma a controlar os fluxos de calor para dentro e para fora dos espaços interiores, proporcionando condições térmicas ambientes favoráveis e confortáveis.

As estratégias de ventilação podem ser divididas em três categorias principais, sendo designadas por ventilação natural, ventilação mecânica e ventilação mista. Na presente dissertação o enfoque recai sobre a ventilação natural.

Define-se sistema de ventilação natural pelo conjunto de meios que permitem o escoamento de ar através do edifício e da sua envolvente, sendo este escoamento promovido por ações naturais. Os meios de ventilação são compostos por aberturas especificamente concebidas para este efeito; não obstante, deve ser tida em conta a permeabilidade do edifício ao ar devido a infiltrações indesejáveis. A ventilação natural é uma estratégia de conceção de baixo consumo energético que está associada ao fluxo de ar gerado pela pressão induzida pelo vento e/ou pelo gradiente diferencial de temperatura através de elementos do próprio edifício tais como, portas, janelas e condutas.

As diferenças de pressão entre o interior e exterior ou mesmo entre dois compartimentos interiores, são responsáveis pelos fluxos de ar, em que a massa de ar movimenta-se desde a zona de maiores pressões para a zona de menores pressões, é expectável e compreensível que vento e a temperatura desempenham um importante papel no processo de deslocação de massas de ar.

Ventilação natural gerada pela diferença de temperatura entre os espaços, também conhecida como tiragem térmica, ocorre devido ao contacto entre distintas massas de ar a diferentes temperaturas. O choque térmico entre cada massa de ar e consequentemente as diferenças de humidade relativa e pressão proporcionam movimentos ascendentes à massa de ar mais quente (com menor massa volúmica) e descendentes à massa de ar mais frio (com maior massa volúmica). É possível relacionar a concentração de vapor de água, a humidade relativa e a temperatura do ar através de um diagrama específico, designado por diagrama psicométrico, como se apresenta na Figura 2.7 [46] .

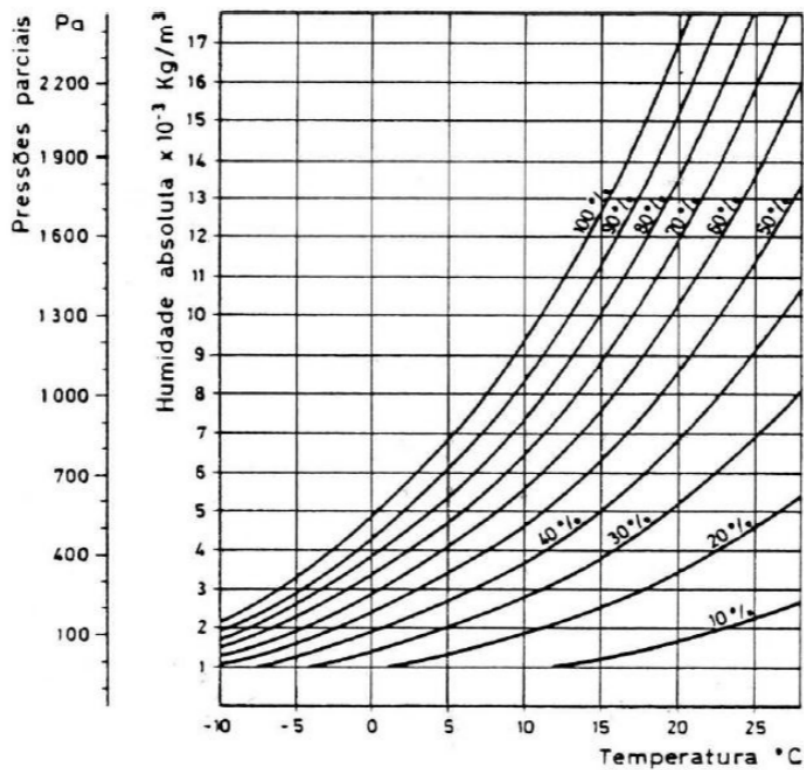


Figura 2.7 - Diagrama psicométrico [46]

O diagrama psicométrico permite visualizar facilmente a relação entre os diferentes conceitos referidos anteriormente, em ordenadas visualizam-se os valores da concentração de vapor de água (g/m^3), em abcissas os valores de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e da pressão de saturação (Pa) em conjunto com as curvas de humidade relativa (em %). As linhas horizontais representam pontos com igual concentração de vapor de água e as verticais pontos de igual temperatura.

O dimensionamento de um sistema que recorre por base à ventilação natural é complexo, visto que, a sua eficiência depende de fatores sazonais e construtivos. No decorrer da estação de aquecimento (inverno) o diferencial de temperatura entre o ambiente exterior e interior é substancial, o que propicia o efeito de tiragem térmica. No verão, estação de arrefecimento, a temperatura no interior é em regra inferior à exterior (exceto em alguns edifícios e/ou em alturas específicas do dia); por esse motivo não ocorre tiragem térmica pelas condutas. Para além destes fatores, a tiragem térmica depende também da altura/cumprimento da conduta. A título de exemplo: a tiragem térmica no último piso de um edifício é em regra pouco eficiente em qualquer altura do ano devido à sua proximidade ao ponto de saída da conduta.

É recomendável que a disposição e orientação das aberturas para o exterior sejam coordenadas com a direção do vento predominante por forma a favorecer a admissão de ar exterior pelos compartimentos principais (ao nível da parede de fachada) e evacuação pelos compartimentos de serviço. Os vãos em comunicação com o exterior devem ser localizados em fachadas de orientação diferentes permitindo o aproveitamento da diferença de pressões provocada pela ação do vento.

2.2.1 Caudal escoado por ventilação

A ventilação está associada à renovação de ar interior através de vãos envidraçados, portas e/ou aberturas realizadas dimensionadas com esse propósito. O caudal médio de ventilação, Q (m^3/s), para uma abertura com dimensões superiores a 10 mm [47], é função da diferença de pressão necessária para que possa ocorrer ventilação. Esta relação é descrita pela seguinte equação (Equação 2.5):

$$Q = C_d \times A \times \left[\frac{2\Delta\rho}{\rho} \right]^{0,5} \quad (2.5)$$

Em que:

- Q - Caudal escoado (m^3/s);
- ρ - Massa volúmica do ar (kg/m^3);
- C_d - Coeficiente de descarga (adimensional);
- A - Área de abertura (m^2);
- $\Delta\rho$ - Diferença de pressão (Pa).

2.2.2 Caudal escoado por infiltração

A permeabilidade ao ar de toda a envolvente do edifício é condicionante para o sistema de ventilação, uma vez que correntemente permite a entrada de caudais de ar consideráveis que podem causar perturbações significativas na implementação de um esquema de ventilação natural. A infiltração corresponde ao fluxo de ar que percorre as fendas e aberturas não protagonizadas no sistema. A infiltração de ar pode apresentar um impacto considerável nas perdas totais de energia, influenciando a qualidade do ar e o conforto térmico dos ocupantes [3]. Por outro lado, a ventilação parasitária também pode representar um contributo relevante para a QAI em edifícios que não têm nenhuma estratégia de ventilação. Este Fenómeno tem vindo a ser progressivamente anulado com o surgimento de soluções de caixilharia mais estanque.

O caudal escoado por infiltração pode ser definido através de um modelo de lei de potência. O modelo é definido pela (Equação 2.6) sendo utilizado no cálculo de infiltração através de fendas [48]; o expoente n varia entre 0,5 e 1, consoante o escoamento seja turbulento ou laminar, respetivamente.

$$Q = C \times \Delta p^n \quad (2.6)$$

Em que:

- Q – Caudal escoado (m^3/s);
- C – Coeficiente de escoamento (m^3/s a 1 Pa);
- Δp – Diferença de pressão (Pa);
- n – Expoente de fluxo (adimensional).

2.2.3 Mecanismos de ventilação natural

As forças que promovem a ventilação natural e a infiltração de ar são proporcionadas pelas ações naturais, do vento, em que o fluxo de ar é originado pelas pressões geradas na envolvente do edifício (ventilação por ação do vento) e/ou pelas diferenças de temperatura (ventilação por efeito chaminé) entre o interior e o exterior do edifício, que promovem diferenças de pressão proporcionadas pelas diferenças da densidade do ar. Os mecanismos e sistemas de obtenção da ventilação natural são especificados de seguida.

- **Ventilação por tiragem térmica**

A ventilação e infiltração de ar de um edifício estão diretamente ligadas ao seu comportamento térmico. As diferenças de temperatura são um fator extremamente condicionante nos mecanismos que permitem ou não uma estratégia de ventilação natural.

A tiragem térmica resulta de diferenças de temperatura que produzem variabilidade na densidade do ar entre o ambiente interior e exterior. Este facto traduz-se num desequilíbrio nas pressões de massas de ar interiores e exteriores, criando um gradiente de pressão vertical. Quando a temperatura interior é superior à temperatura exterior, o fluxo de ar tende a entrar por aberturas localizadas na parte inferior do edifício e, sair por aberturas localizadas num nível superior. O sentido do fluxo é invertido quando as condições diferenciais de temperatura são contrárias às designadas acima [49].

Partindo do pressuposto que a temperatura interior é mais elevada do que a exterior, o movimento de massas de ar pode ser observado na Figura 2.8.

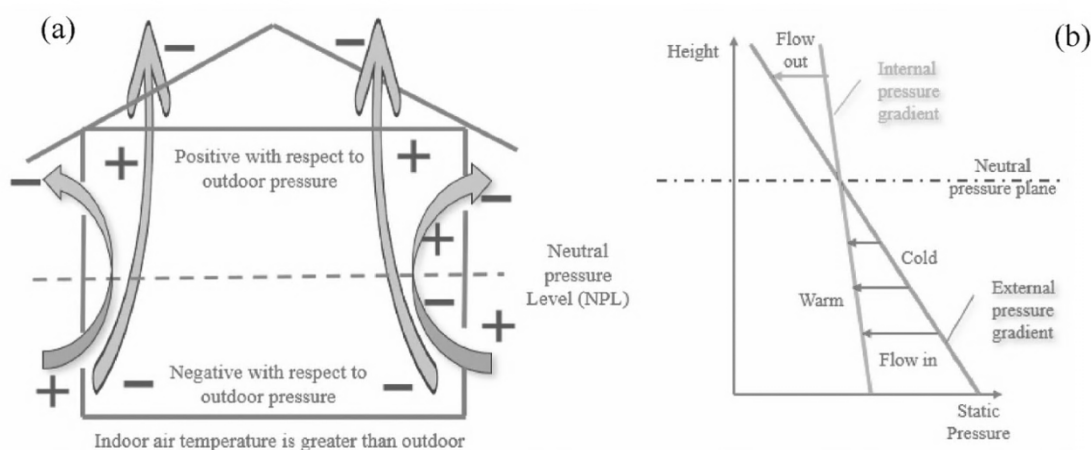


Figura 2.8 - Efeito chaminé. a) Esquema de entrada e saída do fluxo de ar; b) Diagrama de pressões [57]

Os fluxos de ar gerados dependem dos níveis térmicos a que se encontra cada zona da edificação. Na ausência do vento, as diferenças de pressão são a única força motriz capaz de realizar a renovação do ar interior num sistema baseado em ventilação natural [50].

Assumindo duas aberturas posicionadas num elemento vertical (Figura 2.9) a diferentes cotas, z_1 e z_2 , que colocam em contacto massas de ar a temperaturas, θ_o (exterior) e θ_i (interior), a diferença de pressões induzida pelo efeito térmico é dada pela seguinte expressão (eq. 2.7):

$$\Delta p = -\rho_o \times g \times 273 \times (z_2 - z_1) \times \left(\frac{1}{\theta_o + 273} - \frac{1}{\theta_i + 273} \right) \quad (2.7)$$

Em que:

Δp – Diferença de pressão (Pa);

ρ_o – Densidade do ar a 0 °C (kg.m^{-3});

g – Aceleração gravítica ($9,81 \text{ m.s}^{-2}$);
 z_1 e z_2 – Altura das aberturas (m);
 θ_o e θ_i – Temperaturas exterior e interior ($^{\circ}\text{C}$).

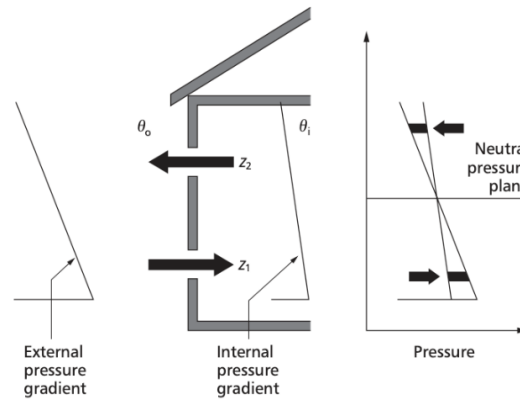


Figura 2.9 – Direção do fluxo de ar quando $\theta_o > \theta_i$ [49]

A Figura 2.10 ilustra o exemplo de uma sala ventilada exclusivamente por gradiente térmico (sem ação do vento) [51]. A temperatura interior é superior à temperatura exterior. As setas cinzentas indicam a distribuição das pressões resultantes no interior da sala e o nível de pressão neutra (NPL). Nesta situação são apresentados dois mecanismos de ventilação possíveis: (a) A massa de ar que apresenta temperatura inferior entra pela abertura posicionada a uma cota inferior (seta azul) e o ar interior, com uma temperatura superior, é expelido por uma abertura de cota superior (seta vermelha); (b) O ar entra e sai pela mesma abertura.

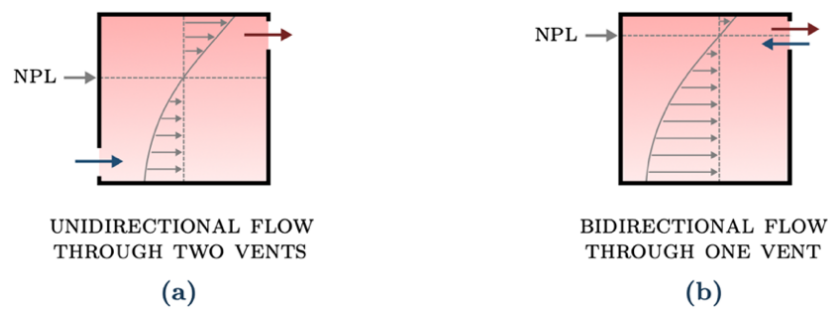


Figura 2.10 - Ventilação por tiragem térmica [115]

Nos casos em que existam aberturas a duas cotas diferentes no mesmo compartimento, permitindo a entrada do ar mais frio pela abertura inferior e saída do ar mais quente pela abertura superior, o valor do caudal pode ser determinado através da equação 2.8 [46]:

$$Q = C_d \times A \times \sqrt{\frac{2gh(T_i - T_e)}{T_m}} \quad (2.8)$$

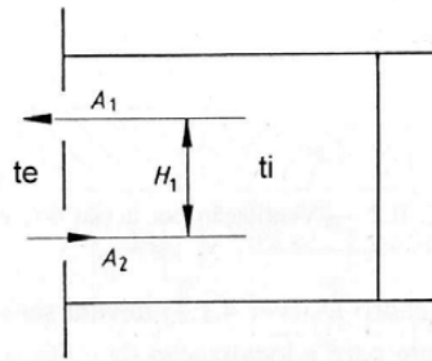


Figura 2.11 - Entradas e saídas de ar a alturas diferentes [46]

Sendo g a aceleração gravítica ($9,81 \text{ m/s}^2$), h a distância entre as linhas médias das aberturas, A a soma das áreas de abertura, T_i e T_e as temperaturas interior e exterior respetivamente e T_m a temperatura média (Kelvin).

- **Ventilação por efeito do vento**

O desempenho dos edifícios relativamente à permeabilidade do ar de portas, janelas e da própria fachada exterior deve ser escolhido tendo em conta a sua exposição ao vento. A consideração da exposição ao vento de um edifício deve ser realizada de acordo com critérios definidos no Eurocódigo 1 – Ações em estruturas, Parte 1-4 [52]. A ação do vento na superfície do edifício é expressa como a diferença de pressão entre a pressão total num ponto e a pressão atmosférica estática. O vento, quando entra em contacto com um edifício, cria diferentes zonas de pressão em cada fachada. Na fachada de barlavento são originadas pressões positivas e na fachada de sotavento pressões negativas. A diferença de pressões em cada fachada proporciona condições adequadas para que o ar exterior entre no edifício a partir da abertura na fachada que sofre pressões positivas (barlavento) e saia pelas aberturas na fachada exposta a pressões negativas (sotavento). A Figura 2.12 pretende exemplificar o esquema de pressões a que um edifício está sujeito aquando da ação do vento.

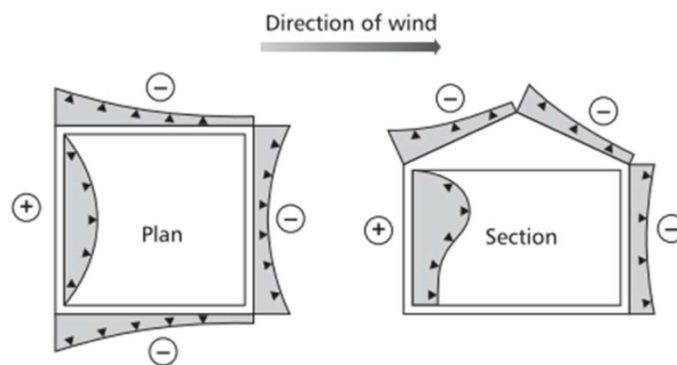


Figura 2.12 - Pressão induzida pelo vento na envolvente de um edifício genérico [49]

O conhecimento da distribuição de pressões nas paredes dos edifícios é extremamente importante para avaliação das forças atuantes e condições de ventilação natural. Os resultados numéricos destas representações variam com a intensidade do vento, forma, dimensão do edifício e características do terreno. A variabilidade de valores obtidos no cálculo do coeficiente de pressão (C_p) são extremamente elevados, dependendo diretamente da quantidade de elementos, geometria da fachada e ainda do valor do ângulo de contacto do vento com a superfície do edificado. A complexidade na determinação do coeficiente de pressão para um determinado edifício ou estrutura requer a utilização de túneis de vento, equações paramétricas ou simulação CFD (Computational Fluid Dynamics), que só é justificada em casos particulares.

As Figuras 2.13 e 2.14 pretendem demonstrar a heterogeneidade dos valores obtidos, comparando uma fachada de um edifício com e sem varandas, respetivamente [51].

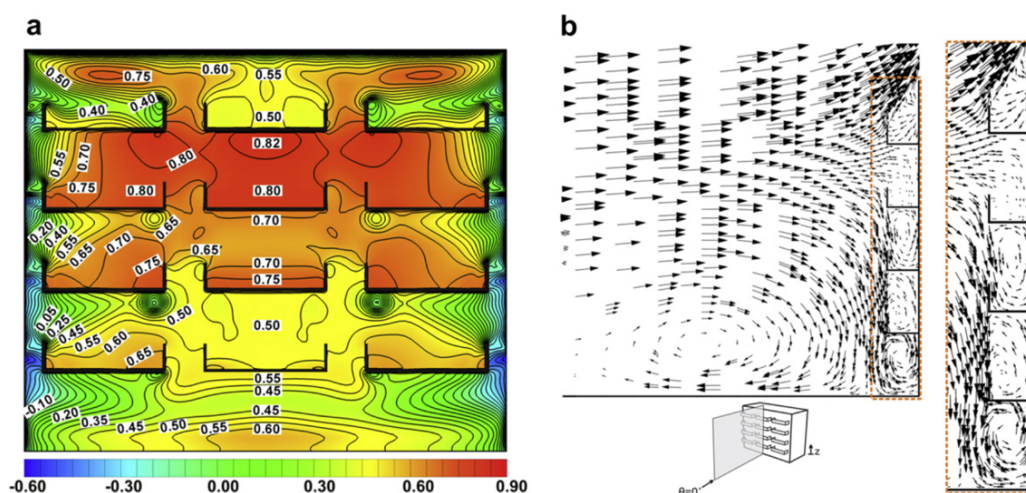


Figura 2.13 - (a) Coeficiente de pressão na fachada de barlavento para uma direção do vento perpendicular à fachada. (b) Campo vetorial da velocidade na secção transversal [51]

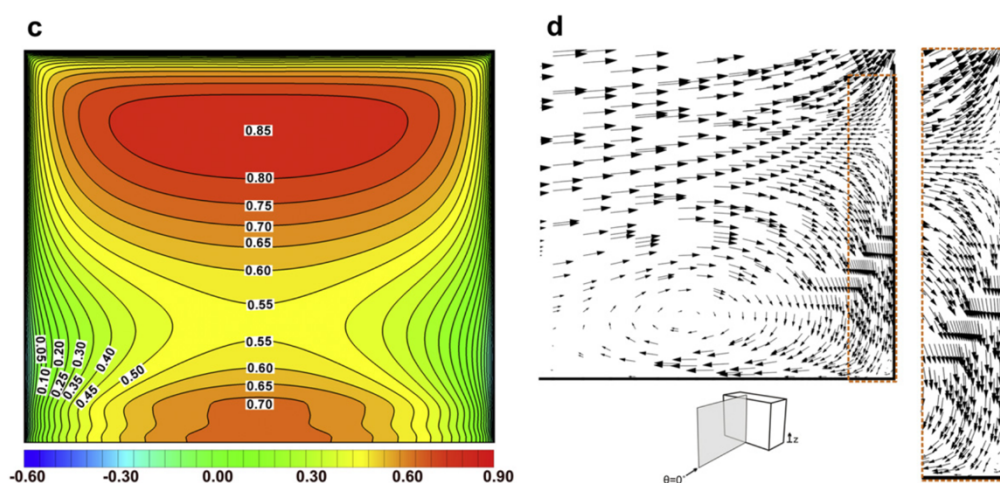


Figura 2.14 - (c) Distribuição dos valores de C_p . (d) Campo vetorial da velocidade na secção transversal [51]

Dada a elevada heterogeneidade de resultados obtidos, devem ser aplicadas correções para que possa ser possível obter valores que transmitam um elevado grau de confiança, refletindo a situação real.

A equação paramétrica mais utilizada para edifícios comuns é a de Swami e Chandra [53]. Ao longo dos anos outros autores tentaram alargar o trabalho já desenvolvido propondo a inclusão de novas variáveis, tais como, os efeitos de edifícios adjacentes. Uma revisão de inúmeras equações e metodologias foi apresentada por Cóstola *et al.* podendo servir de base crítica para a avaliação dos métodos a adotar [54].

A proposta de equação de Swami e Chandra para o cálculo do coeficiente de pressão é enunciada de seguida (Equação 2.9):

$$C_p = C_p(0^\circ) \times \ln(1,248 - 0,703 \times \sin \frac{\theta}{2} - 1,175 \times \sin^2 \theta + 0,131 \times \sin^3(2G\theta) + 0,769 \times \cos \frac{\theta}{2} + 0,07G^2 \times \sin^2 \frac{\theta}{2} + 0,171 \times \cos^2 \frac{\theta}{2}) \quad (2.9)$$

Em que:

- $C_p(0^\circ) = 0,6$ – para edifícios de baixa altura;
- θ - Ângulo de incidência do vento;
- $G = \ln(S)$, sendo S o rácio entre o comprimento e largura do edifício.

Nas a normas europeias, é aconselhada a utilização da equação de Bernoulli (Equação 2.10) para o cálculo do coeficiente de pressão

$$\frac{v^2}{2} + h + \frac{P}{\rho} = C \quad (2.10)$$

Em que:

- v^2 – Velocidade do vento (m/s);
- h – Altura (m);
- P – Pressão;
- ρ - Massa volúmica do ar (kg/m³);
- C – Coeficiente de pressão.

O vento é um fenómeno natural extremamente imprevisível, uma vez que tem associadas variáveis como a direção e velocidade. Por esta razão é essencial efetuar previsões bem estruturadas sobre o seu impacto na conceção de sistemas de ventilação. Para além do coeficiente de pressão, a velocidade do vento é um parâmetro essencial para a caracterização da ação do vento na ventilação natural dos edifícios.

É possível a utilização da expressão (Equação 2.11) disponibilizada pelo British standard 5925: 1991 [55], que pretende aproximar com detalhe a velocidade do vento em contacto com um edifício.

$$V_z = V_m \times k \times Z^a \quad (2.11)$$

Em que:

- V_z – Velocidade do vento a uma dada altura (m.s⁻¹);
- V_m – Velocidade do vento em campo aberto a uma altura de 10m, (m.s⁻¹)
- Z – Altura do edifício (m);

As constantes k e a são dependentes das condições do terreno, apresentando-se os seus valores na Tabela 2.3:

Tabela 2.3 - Coeficientes de terreno para a velocidade do vento. (Adaptado de: [35])

| Terreno | k | a |
|----------------------|------|------|
| Aberto e plano | 0.68 | 0.17 |
| Com quebras de vento | 0.52 | 0.20 |
| Urbano | 0.35 | 0.25 |
| Cidade | 0.21 | 0.33 |

O Eurocódigo 1- parte 1:4 apresenta uma abordagem diferente em que a velocidade média do vento é obtida afetando um valor de referência de coeficientes que refletem a rugosidade e a orografia do terreno [52]. A equação da velocidade do vento é apresentada de seguida (Equação 2.12):

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b \quad (2.12)$$

Em que:

- $v_m(z)$ – Velocidade média do vento;
- $c_r(z)$ – Coeficiente de rugosidade;
- $c_0(z)$ – Coeficiente de orografia;
- v_b – Velocidade de referência do vento.

Atendendo aos conceitos enunciados, é possível compreender o cálculo do caudal de ar associado à ventilação por efeito do vento.

O caudal volúmico Q (m³/s) de uma abertura é função da área equivalente da abertura (em m²), do coeficiente de vazão C_d (assumindo o valor geral de 0,6) e do coeficiente de pressão ou das diferenças de pressão entre o interior e o exterior, podendo o seu valor ser obtido através da utilização da equação seguinte [46]:

$$Q = C_d \times A \times v \sqrt{\Delta C_p} = C_d \times A \sqrt{\frac{2 \times \Delta P}{\rho}} \quad (2.13)$$

Sendo v a velocidade do vento (m/s) e ρ a massa volúmica do ar. Como referido anteriormente, a determinação da velocidade do vento é dependente da identificação de características aerodinâmicas do edifício e do terreno em que esteja inserido.

Em casos de ventilação transversal entre aberturas posicionadas em fachadas diferentes, existem duas possibilidades distintas que definem diferentes abordagens de cálculo para as áreas equivalentes das aberturas (A).

- Entrada de ar numa fachada e saída noutra:

$$\frac{1}{A^2} = \frac{1}{(A_1 + A_2)^2} + \frac{1}{(A_3 + A_4)^2}$$

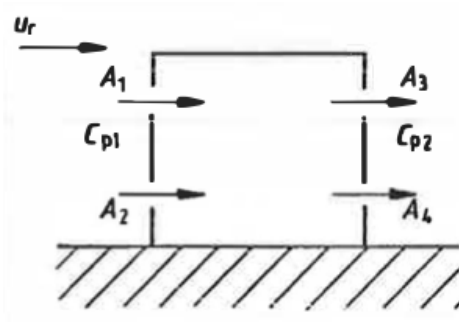


Figura 2.15 - Entradas e saídas de ar na mesma fachada [55]

- Entradas e saídas de ar em ambas as fachadas:

$$\frac{1}{A^2} = \frac{1}{(A_1 + A_3)^2} + \frac{1}{(A_2 + A_4)^2}$$

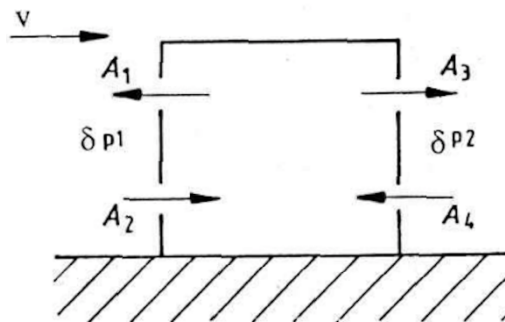


Figura 2.16 - Entradas e saídas de ar em ambas as fachadas [46]

- **Efeito Combinado**

O efeito combinado dos dois mecanismos descritos é facilmente encontrado em edifícios, conduzindo a pressões atuantes superiores. Os dois mecanismos de ventilação natural podem atuar em conjunto ou em oposição. Por forma a maximizar ambos os efeitos, deve ser implementada uma abordagem de projeto criteriosa.

A diferença de pressão resultante é igual à soma das componentes originadas pelo efeito de tiragem térmica (ΔP_s) e efeito do vento (ΔP_w). A diferença de pressão total (ΔP_{total}) é apresentada na (Equação 2.14) [56]:

$$\Delta P_{total} = \Delta P_s + \Delta P_w \quad (2.14)$$

A Figura 2.17 ilustra a direção do fluxo de ar e a relação entre a pressão e altura de um edifício para um caso de ventilação natural que promova a utilização dos dois mecanismos em simultâneo.

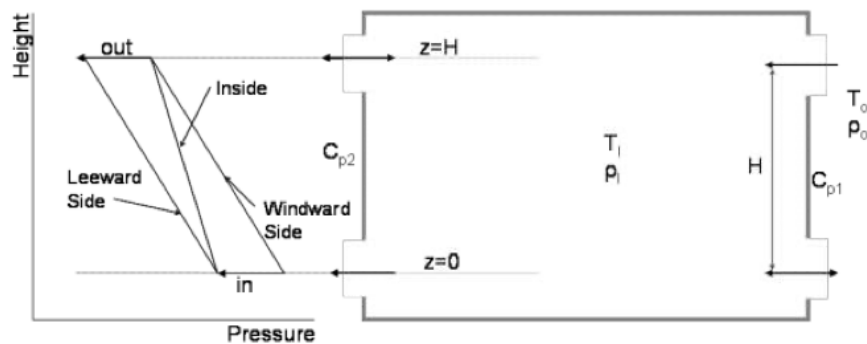


Figura 2.17 - Ventilação por efeito combinado: relação entre direção do fluxo de ar, pressão e altura do edifício [56]

2.2.4 Estratégias de ventilação natural

Como visto até agora, considerando diferentes forças impulsionadoras, a ventilação natural pode ser dividida em ventilação por efeito do vento, ventilação por tiragem térmica e combinação dos dois mecanismos.

Neste subcapítulo, pretende-se classificar a ventilação natural quanto às estratégias possíveis de aplicação. Geralmente a ventilação natural pode ser classificada em duas estratégias de aberturas, ventilação cruzada e unilateral.

- **Ventilação unilateral**

Conforme expresso na Figura 2.18, a ventilação unilateral é referente a aberturas que permitem a ligação entre o ambiente interior e exterior localizadas apenas numa fachada do edifício. A ventilação unilateral é adotada recorrendo a um sistema composto por diversos orifícios ou uma única abertura com dimensões razoáveis para que seja possível a circulação de massas de ar nos dois sentidos, do exterior para o interior e de interior para o exterior. A troca de massas de ar pode ser efetuada através da tiragem térmica e/ou por ação da pressão efetuada pelo vento. A Figura 2.18 ilustra uma situação em que a ventilação unilateral é efetuada por uma abertura e outra em que são utilizadas duas aberturas, relacionando a profundidade máxima do espaço para cada situação (H- altura; W- profundidade). Para que seja possível conceber um sistema baseado em ventilação unilateral é necessário ter em conta ao espaço que se pretende ventilar tem de apresentar uma determinada relação entre a altura e profundidade [57].

Gan [58] desenvolveu um modelo baseado em modelação CFD com o objetivo de apresentar os parâmetros que influênciam a profundidade efetiva para a distribuição de ar fresco em sistemas que recorram a ventilação unilateral. Os resultados constatarem que a profundidade máxima de um espaço a ventilar com recurso a uma estratégia unilateral é dependente da dimensão de abertura, ganhos de calor interno e temperatura do ar exterior.

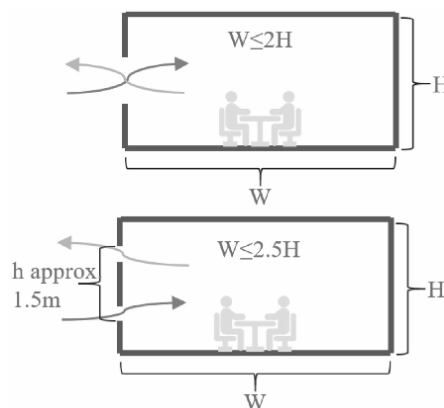


Figura 2.18 – Ventilação unilateral [57]

- **Ventilação cruzada**

A ventilação cruzada é efetuada através de aberturas posicionadas em fachadas opostas beneficiando da direção do vento dominante. De modo a garantir a eficiência do sistema é necessário ter em conta a posição geográfica do edifício e a distância entre as aberturas posicionadas nas fachadas distintas. Não existe consenso acerca da distância mínima recomendável para a execução desta estratégia de ventilação. Alguns autores aconselham uma distância inferior a cinco vezes a altura do pé direito (distância medida desde o pavimento até ao teto

do compartimento) [57]. Para outros autores a mesma distância não deve exceder duas a duas vezes e meia a altura do pé direito [59].

A Figura 2.19 ilustra o esquema de um sistema baseado em ventilação cruzada.

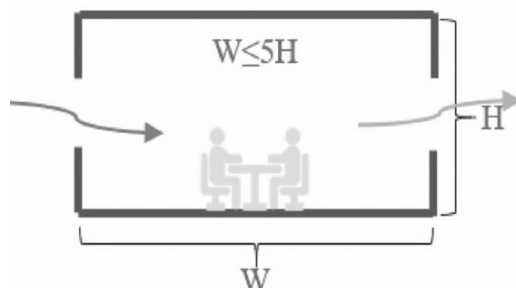


Figura 2.19 - Ventilação cruzada [57]

2.3 Poluentes Aéreos

Neste subcapítulo pretende-se descrever o que são poluentes e de que forma podem interferir na sociedade, desde o impacto na saúde da população até à capacidade de deterioração do património histórico e cultural do planeta.

Em primeiro lugar, é imperativo definir alguns termos deste domínio, nomeadamente a distinção entre poluente e contaminante. Na presente dissertação, a separação entre os dois termos é efetuada com base na perspetiva da conservação e preservação do património histórico e cultura, podendo diferir doutros domínios e aéreas de investigação. Um contaminante pode ser um gás, um aerossol, um líquido ou um sólido de origem natural ou antropogénica que altera a pureza de um determinado objeto sem o danificar. O poluente pode também ser um gás, um aerossol, um líquido ou um sólido de origem antropogénica ou natural, mas que danifica determinado objeto, podendo corroer, descolorar, desfigurar, acidificar e enfraquecer materiais. Para que seja mais fácil perceber esta separação recorre-se a um exemplo, um objeto poroso como um casaco de couro pode absorver vários compostos voláteis (COVs); estes compostos são definidos como contaminantes desde que não exista uma evidência clara de danos [60]. Outro exemplo possível é a absorção de formaldeído por parte do papel de celulose sem que seja possível identificar qualquer dano [61]. No âmbito da conservação, é recomendável ter uma estratégia de controlo centrada em poluentes ao invés de contaminantes.

As fontes emissoras de poluentes atmosféricos podem ser classificadas como antropogénicas (resultantes da atividade humana) ou naturais (erupções vulcânicas, incêndios florestais, erosão eólica do solo). Na grande maioria dos casos, a degradação da qualidade do ar é derivada de emissões de origem antropogénicas. Destacam-se como principais fontes emissoras antropogénicas o tráfego rodoviário, aéreo e marítimo e a atividade industrial [62]. As concentrações de poluentes aéreos estão diretamente condicionadas pelas suas emissões, mas são também influenciadas pela variabilidade atmosférica, que desempenha um papel

fundamental no processo de transporte e dispersão dos poluentes. Fatores como a topografia, vento, pressão atmosférica, temperatura, precipitação e radiação solar são preponderantes. O vento é um fator determinante no transporte e difusão dos poluentes [63]. O transporte está dependente do “vetor médio do vento” (definido pela direção e velocidade); a difusão é condicionada pela turbulência, correspondente a variações de velocidade em curtos períodos [64]. A velocidade do vento é um dos principais fatores de dispersão, em meio urbano [65]. Condiciona principalmente a massa de ar em que os poluentes se vão difundir e a distância de transporte.

O ar pode conter diversos poluentes, embora apenas um número limitado seja objeto de regulamentação, devido aos seus efeitos nocivos para a saúde humana e ambiente. Os efeitos da exposição a poluentes aéreos dependem principalmente das suas concentrações na atmosfera e do tempo de exposição, podendo, a título de exemplo, exposições prolongadas a concentrações reduzidas de poluentes serem mais nocivas do que exposições de curta duração a elevadas concentrações. Por esta razão, os valores regulamentares são definidos para períodos distintos (ano, dia, hora), uma vez que o efeito de cada poluente depende do tempo de exposição. A poluição atmosférica urbana é um dos principais fatores de deterioração da qualidade de vida das populações. O desenvolvimento desequilibrado dos espaços urbanos e questões como a mobilidade constituem problemas óbvios com forte impacto ao nível da qualidade do ar nas grandes metrópoles. Em 2000, perto de metade da população mundial (48%) vivia em zonas urbanas prevendo-se que o número de habitantes em espaços urbanos cresça 2% por ano durante as próximas três décadas. A Tabela 2.4 aponta para um aumento de população mundial de 6.1 mil milhões em 2000 para 8.1 mil milhões em 2030, com o principal crescimento concentrado nas zonas urbanas [66].

Tabela 2.4 – Distribuição da população mundial. (Adaptado de: [67])

| Localização | População (em bilhões) | | | |
|-----------------------------|------------------------|------|------|------|
| | 1950 | 1975 | 2000 | 2030 |
| Planeta | 2.52 | 4.07 | 6.07 | 8.13 |
| Regiões mais desenvolvidas | 0.81 | 1.05 | 1.19 | 1.24 |
| Regiões menos desenvolvidas | 1.71 | 3.02 | 4.88 | 6.89 |
| População urbana | | | | |
| Planeta | 0.73 | 1.52 | 2.86 | 4.94 |
| Regiões mais desenvolvidas | 0.43 | 0.7 | 0.88 | 1.01 |
| Regiões menos desenvolvidas | 0.31 | 0.81 | 1.97 | 3.93 |
| População rural | | | | |
| Planeta | 1.79 | 2.55 | 3.21 | 3.19 |
| Regiões mais desenvolvidas | 0.39 | 0.34 | 0.31 | 0.23 |
| Regiões menos desenvolvidas | 1.4 | 1.4 | 2.9 | 2.96 |

A centralização de população em centros urbanos tem contribuído fortemente para um aumento substancial da concentração de poluentes aéreos. Em 2021, um relatório do Instituto Nacional de Estatística (INE) apontava para uma população perto de três milhões residente na Área Metropolitana de Lisboa, ou seja, perto de 30% da população total em Portugal.

Os poluentes atmosféricos são emitidos através de fontes existentes e, posteriormente transportados, dispersados e depositados por dois tipos de ações, gravítica húmida (lavagem da chuva ou neve) ou deposição seca (adsorção de partículas). Os compostos poluentes podem apresentar um efeito negativo imediato e localizado, podendo também numa escala de tempo prolongada contribuir para danos irreversíveis. Veja-se o exemplo de uma pluma de fumo negro emitida por um veículo movido a combustão; para o observador é visualmente desagradável no imediato; numa escala de tempo prolongada de exposições repetidas o fumo expelido pode provocar escurecimento das fachadas dos edifícios por deposição de partículas nas suas superfícies.

O tráfego automóvel é um problema central nas grandes cidades mundiais. A combustão de hidrocarbonetos presentes nos combustíveis resulta maioritariamente na produção de dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O). Contudo, a combustão nem sempre é cem por cento eficiente, implicando que uma parte do combustível não seja queimado. Nestes casos o produto da combustão é mais complexo podendo ser constituído por hidrocarbonetos e outros compostos orgânicos. Além disto, as condições de combustão, caracterizadas por altas pressões e temperaturas, propiciam a oxidação de frações de óxidos de azoto (NO_x) [67]. A contribuição média do tráfego automóvel para a poluição atmosférica foi determinada num estudo feito para o Reino Unido em 1999 [68].

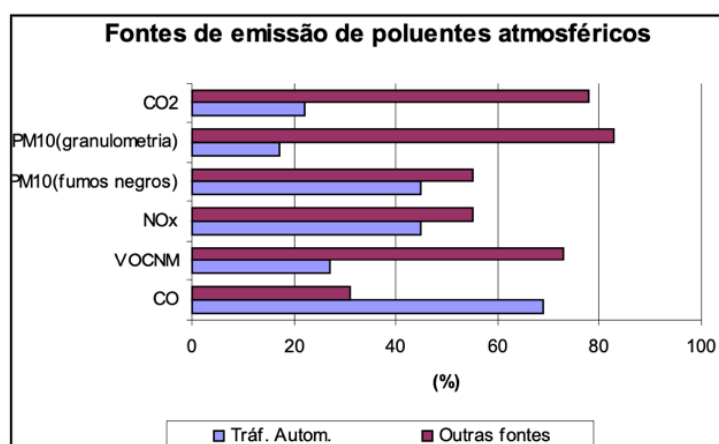


Figura 2.20 - Contribuição do tráfego automóvel e outras fontes para a poluição atmosférica [68]

É apresentada, de seguida, a metodologia que Portugal adota para dar resposta à avaliação de poluentes atmosféricos exteriores [69]:

- Identificação das principais fontes emissoras a nível nacional de cada um dos poluentes em análise;

- Análise dos dados relativos a estações de medição fixas;
- Realização de campanhas de medição indicativa da qualidade do ar.

De modo a contextualizar o tema, a Tabela 2.5 indica os objetivos genéricos de cada tipo de estação e os respetivos poluentes que podem ser medidos.

Tabela 2.5 - Tipo de estações, objetivos de monitorização e respetivos poluentes a analisar. (Adaptado de:[70])

| Classes de estações | Objetivos | Poluentes | |
|---------------------|---|---|----------------------|
| Tráfego | Informação sobre a exposição ao qual a população situada nas proximidades de uma infra-estrutura rodoviária é susceptível de estar exposta. | CO, NOx, PM10 | |
| Industrial | Informação sobre o nível máximo ao qual a população próxima a uma fonte fixa está susceptível de estar exposta. | SO2, COV, Nox | |
| Fundo | Urbana | Monitorizar a exposição média da população aos fenómenos de poluição atmosférica dita de fundo nos centros urbanos. | O3, SO2, COVs, PM2.5 |
| | Suburbana | Monitorizar a poluição fotoquímica principalmente o ozono e os seus precursores e possíveis poluentes primários. | O3, NOx, PM10 |
| | Rural | Avaliação da exposição dos ecossistemas e da população à poluição atmosférica de fundo. | NOx, PM10, PM2.5, O3 |

Como referido anteriormente, a presente dissertação tem principal enfoque na Região de Lisboa e Vale do Tejo (RLVT). A rede de monitorização da qualidade do ar (RMQA) é atualmente constituída por 24 estações [70].

Desde 2014 que a RLVT é constituída por quatro zonas homogéneas, “Área Metropolitana de Lisboa Norte”, “Área Metropolitana de Lisboa Sul”, “Setúbal” e “Oeste, Vale do Tejo e Península de Setúbal”. O critério de definição da delimitação das unidades de gestão e avaliação da qualidade do ar ambiente na RLVT é definido com base na distinção entre zona e aglomeração.

- **Zona:** definida como uma área geográfica de características homogéneas, em termos de qualidade do ar, ocupação de solo e densidade populacional [71].
- **Aglomeração:** zona que constitui uma conurbação caracterizada por um número de habitantes superior a 250 000 ou em que o número de habitantes se situe entre os 250 000 e os 50 000 e tenha uma densidade populacional superior a 500 hab/km² [71].

Na Figura 2.21, é possível visualizar a localização das estações de monitorização fixas localizadas na RLVT [70].

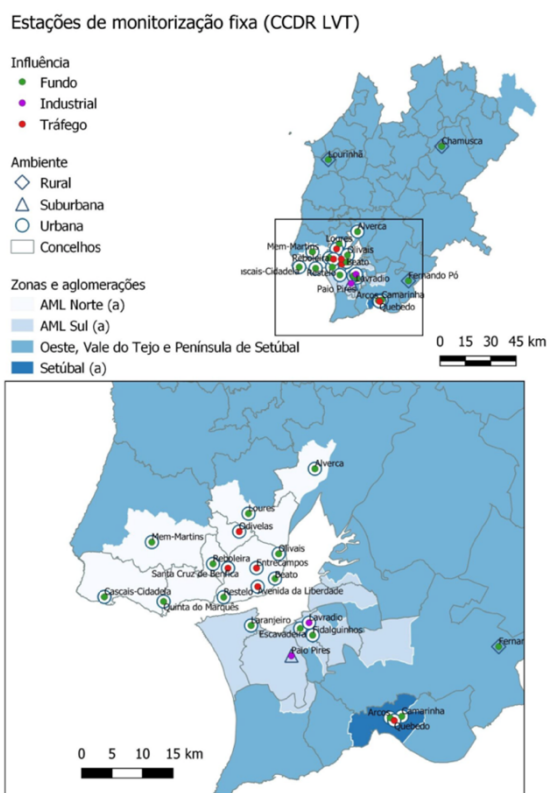


Figura 2.21 - Rede monitorização RLVT [70]

A dispersão de poluentes aéreos na atmosfera inclui dois mecanismos: o transporte, dependente de movimentos do ar, a diferentes escalas, e a difusão, devida à turbulência térmica [72]. Estes processos são dependentes das interações entre fatores atmosféricos, condições de emissão e características da superfície (topografia). A variação temporal da qualidade do ar pode apresentar uma componente cíclica de carácter anual, mensal ou diário, resultante da combinação de variações das emissões com as condições atmosféricas do local [63].

A estratificação térmica da atmosfera condiciona a dispersão de poluentes atmosféricos. Os casos de maior estabilidade são característicos de noites de forte arrefecimento radiativo da superfície, ou por outro lado, o contacto de massas de ar com superfícies frias. A condição favorável para uma forte concentração de poluentes diz respeito a inversões térmicas. Em Lisboa as inversões de subsidência assumem um papel fundamental sobretudo no verão (84 a 89% do total das inversões térmicas) [73].

Lisboa apresenta uma disposição com elevado grau de risco em termos de emissões de gases poluentes. Além do fator rodoviário, a proximidade do aeroporto, porto marítimo e indústria contribuem fortemente para as concentrações de poluentes na cidade.

A Agência Portuguesa do Ambiente (APA) desenvolveu o “Índice de Qualidade do Ar” com o objetivo de traduzir a qualidade do ar ambiente no território nacional. O índice classifica o ar através de uma escala de cores dividida em cinco classes, de “Mau” a “Muito bom”. O cálculo do índice é realizado com base nas concentrações medidas dos poluentes, ozono

(O₃), material particulado (PM₁₀ e PM_{2,5}), dióxidos de azoto (NO_x) e compostos de enxofre, nomeadamente dióxido de enxofre (SO₂). O índice de qualidade do ar sob a forma de escala de cores e com os intervalos de concentrações de poluentes em µg/m³ é apresentado na Tabela 2.6 [74].

Tabela 2.6 - Índice da qualidade do ar µg/m³. (Adaptado de: [74])

| Classificação | PM ₁₀ | PM _{2,5} | NO ₂ | O ₃ | SO ₂ |
|---------------|------------------|-------------------|-----------------|----------------|-----------------|
| Muito bom | 0-20 | 0-10 | 0-40 | 0-80 | 0-100 |
| Bom | 21-35 | 11-20 | 41-100 | 81-100 | 101-200 |
| Médio | 36-50 | 21-25 | 101-200 | 101-180 | 201-350 |
| Fraco | 51-100 | 26-50 | 201-400 | 181-240 | 351-500 |
| Mau | 101-1200 | 51-800 | 401-1000 | 241-600 | 501-1250 |

A análise da presente dissertação incide na propagação e concentração de um conjunto de poluentes que se consideram relevantes. Nos subcapítulos seguintes pretende-se contextualizar cada um desses poluentes nomeadamente, ozono (O₃), material particulado (PM₁₀ e PM_{2,5}), dióxidos de azoto (NO_x) e dióxido de enxofre (SO₂).

2.3.1 Compostos de Enxofre (SO_x)

A fonte natural de emissões de compostos de enxofre com maior relevância são os vulcões, globalmente representam cerca de 20% do total de emissões de composto de enxofre [75]. No entanto, em centros urbanos as emissões resultantes da combustão de combustíveis fósseis sólidos são a principal preocupação na propagação de dióxido de enxofre (SO₂.) As emissões de SO₂ contribuíram para uma vasta série de acidentes graves de poluição por *smog* nas décadas de 50 e 60, tendo como exemplo, o *Grande Smog* em Londres em 1952 [76]. Tanto o petróleo como o carvão contêm enxofre em quantidades variáveis, pelo que ambos produzem dióxido de enxofre quando queimados. A relação entre o SO₂ e a formação de sulfatos não é linear; partindo de uma concentração reduzida de dióxido de enxofre e aumento gradual, a tendência é de aumento de proporcional de sulfatos, mas quando a concentração de SO₂ já é elevada e tende a aumentar ainda mais não se regista um aumento de sulfatos [77].

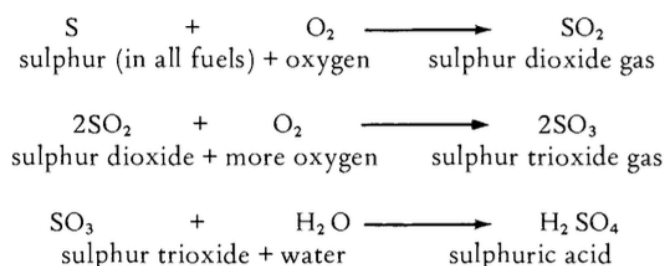


Figura 2.22 - Formação ácido sulfúrico [77]

Cox e Penkett, com o objetivo de estudar a produção de “smog fotoquímico”, relataram a foto-oxidação do SO_2 na presença e na ausência de NO , concluindo que a oxidação do SO_2 em H_2SO_4 foi fortemente aumentada na presença de NO [78].

Os óxidos de enxofre têm uma vida útil troposférica curta mesmo assim a perturbação imposta na química troposférica estende-se por muitos anos. Pesquisas recentes indicam que apesar da curta duração destes compostos na atmosfera a propagação pode chegar a ser transcontinental [79]. O dióxido de enxofre está ligado à formação de aerossóis de sulfato que refletem a luz solar atuando ainda como nuvens de condensação.

As emissões de gases por parte de fontes antropogênicas apresentam um impacto significativo na atmosfera da Terra, especialmente na troposfera inferior e, por sua vez, na alteração do clima com efeitos negativos na biosfera [80]. A combustão generalizada de combustíveis fósseis tem, por conseguinte, aumentado consideravelmente as emissões de compostos de enxofre para a atmosfera, sendo a componente antropogênica atualmente substancialmente superior às emissões naturais numa escala global [81].

Em Portugal, as emissões de SO_x estão principalmente ligadas à queima de combustível nas indústrias de energia e transformadora. Em Lisboa são ainda de destacar emissões ligadas ao transporte aéreo e marítimo pela proximidade do Aeroporto Humberto Delgado e o Porto Marítimo de Lisboa ao centro da cidade [70].

O SO_2 é um gás irritante que potencia o aparecimento de doenças respiratórias crônicas podendo ainda agravar problemas cardiovasculares. Em contacto com a humidade do ar, o dióxido de enxofre sofre uma transformação para ácido sulfúrico participando no fenómeno de formação de chuvas ácidas. Quando o ácido sulfúrico entra em contacto com o carboneto de cálcio, produz-se efervescência derivada da libertação de CO_2 , contribuindo para a erosão e degradação dos materiais de diversos monumentos, podendo o seu efeito de degradação ser visualizado na Figura 2.23 [5, 75].



Figura 2.23 - Degradação por reação química [75]

2.3.2 Ozono (O₃)

O Ozono é uma molécula formada por três átomos de oxigénio, sendo extremamente importante na função que desempenha ao nível da estratosfera filtrando a radiação solar ultravioleta. Ao nível da troposfera, camada atmosférica em contacto com a superfície terrestre, o ozono é classificado como um poluente secundário, agressivo para as mucosas oculares e respiratórias com um impacto bastante negativo na saúde da população [82], sendo ainda um forte oxidante para a vasta maioria dos materiais orgânicos danificando pinturas, têxteis e mobiliário [83].

O Ozono pode ser formado através de dois processos, um natural e outro artificial:

1. Produção natural na estratosfera;

O ozono é produzido na estratosfera, a uma distância de 20-30km, derivado da reação da radiação UV com o oxigénio (O₂). A radiação UV que é responsável por esta reação é de um comprimento de onda muito curto comparado com a que chega à superfície terrestre. A razão pela qual não existe radiação UV com um comprimento de onda inferior a 300nm ao nível do solo devem-se ao ozono presente na estratosfera que absorve efetivamente esta radiação.

2. Efeitos da luz solar sobre gases de escape dos automóveis (fotoquímico);

O O₃ ao nível da troposfera forma-se através de um conjunto de reações entre poluentes primários tais como óxidos de azoto e compostos orgânicos voláteis (COV) quebrando ligações de cadeias de carbono e monóxido de carbono por ação da radiação solar (UV) [84]. A revisão das reações envolvidas no processo completo é disponibilizada por Durbin e Hecht [85]. A reação que desencadeia todo o processo é a quebra do dióxido de azoto (NO₂) pela luz solar, formando o NO + O. O átomo de oxigénio libertado por esta reação fica disponível para combinar com o O₂ dando origem ao ozono.

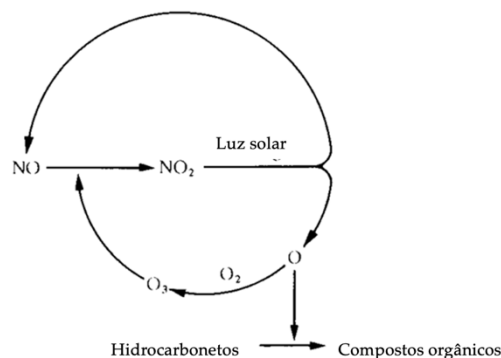


Figura 2.24 - Formação de ozono a partir de óxidos de azoto. (Adaptado de: [77])

Nos ambientes urbanos o ozono apresenta um ciclo diário típico. A emissão de poluentes precursores, associada à forte utilização de automóveis nas grandes metrópoles ocorre ao início da manhã. Este fator conjugado com o aumento da intensidade de radiações UV ao início da tarde propicia o pico das concentrações de O₃.

A possibilidade de o ozono atuar como acelerador da foto-oxidação foi levantada por Briner [86]. Do seu trabalho pode concluir-se que cada molécula de ozono que reage com uma determinada superfície proporciona que cerca de 100000 moléculas de oxigénio reajam também. Posto isto, as concentrações de ozono podem influenciar a deterioração de todos os materiais orgânicos. Atualmente, esta é uma questão com necessidade de mais estudos, mas é evidente a importância para investigações futuras sobre preservação.

Poucos estudos foram realizados acerca da concentração de ozono em interiores. Derwent efetuou medições na National Gallery quando a concentração exterior, em Trafalgar Square, era de 80 µg/m³, concluindo que a qualidade do ar interior melhorava quando adotados sistemas de ventilação eficazes, capazes de reduzir a entrada de poluentes exteriores. O estudo destacou que mesmo com filtragem do ar, parte das partículas finas e gases, como o dióxido de enxofre e nitrogénio conseguiam penetrar no ambiente interior [87].

Muller sugere, com base nos seus trabalhos, que a meia-vida do ozono em ambientes fechados é de cerca de seis minutos, devido à proximidade das superfícies com as quais reage. Por outro lado, Davies. *et al* concluíram que o ozono no centro de Sainsbury Centre (Norwich, Reino Unido) era 70% da concentração exterior [88].

Em 2022 o objetivo de longo prazo para a proteção da saúde humana foi ultrapassado em todas as estações da RMQA LVT.

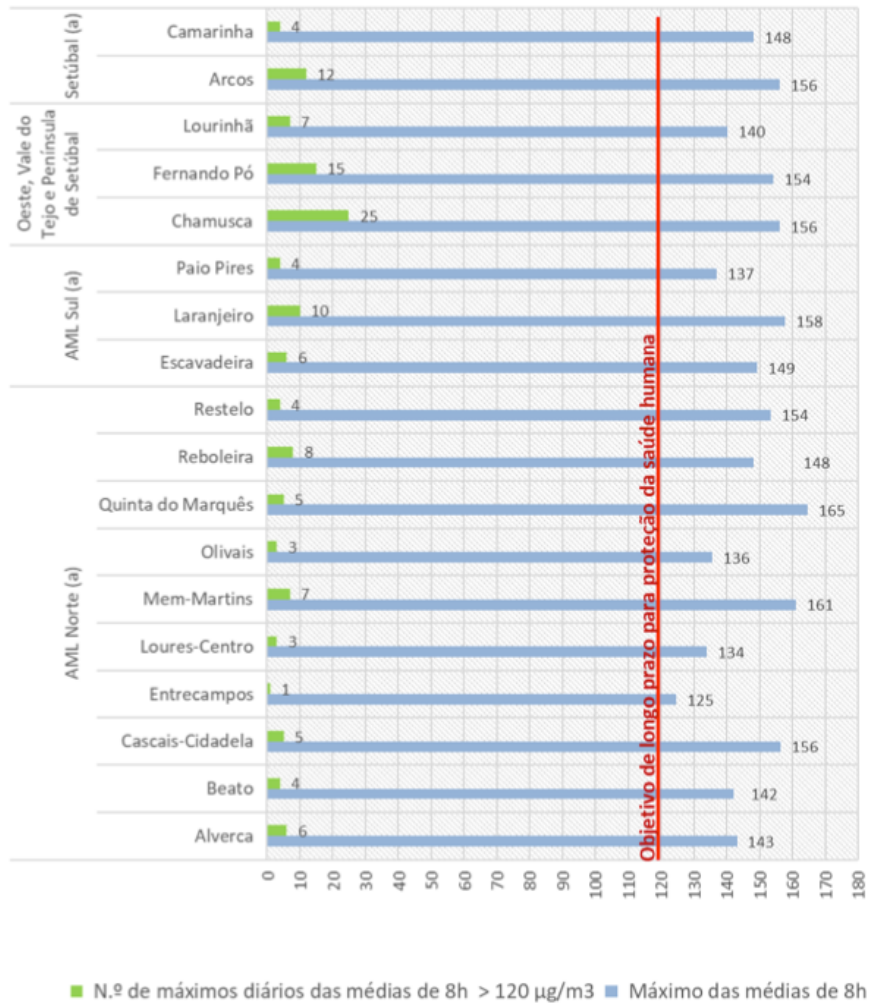


Figura 2.25 - Avaliação do objetivo de longo prazo para a proteção da saúde humana para o ozono em 2022 [70]

2.3.3 Óxidos de Azoto (NO_x)

A lista de óxidos de azoto possíveis é extensa, relativamente à importância enquanto poluentes atmosféricos destacam-se o monóxido de azoto (NO) e o dióxido de azoto (NO₂), embora apenas o NO₂ seja alvo de regulamentação.

Os óxidos de azoto são subprodutos de processos de combustão a altas temperaturas. A redução de NO_x proveniente de emissões é indispensável tanto em aplicações estacionárias como móveis. Os óxidos de azoto apresentam diversos impactos adversos para a saúde humana, meio ambiente e ecossistemas biológicos. As emissões provenientes de fontes móveis contribuem para praticamente metade de todos os NO_x produzidos e emitidos, como pode ser observado na Figura 2.26.

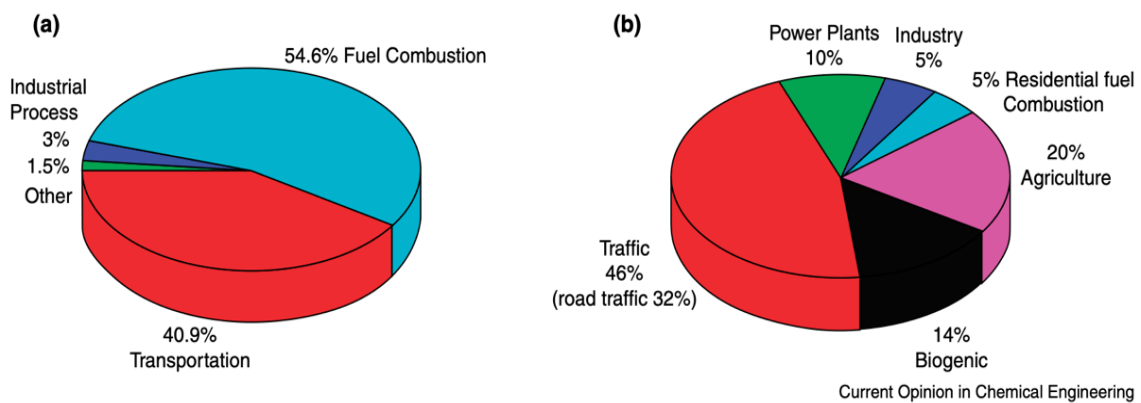


Figura 2.26 - Emissões de NOx por categoria [66]

Assim como o dióxido de enxofre, o dióxido de azoto é solúvel em água, resultando na origem de um ácido forte, neste caso ácido nítrico [77]:

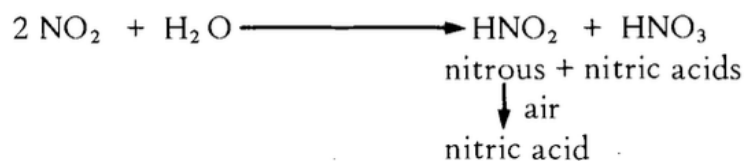


Figura 2.27 - Formação ácido nítrico [77]

O ácido nítrico é tão forte e oxidante quanto o ácido sulfúrico, sendo também responsável pela formação de chuvas ácidas, corrosão de metais e erosão de pedras calcárias, constituindo um problema para a preservação do edificado histórico em Portugal, principalmente para a pedra exposta à intempérie [77]. Em concentrações elevadas, o NO₂ é responsável pela irritação dos olhos e garganta, provocando ainda diminuição da capacidade respiratória, dores no peito e danos no sistema nervoso central.

Em Lisboa os meios de transporte de cargas e passageiros representam cerca de 97% de todas as emissões de NO_x, sendo o transporte rodoviário responsável por 68%, o marítimo por 12% e o aéreo por 17% [70].

2.3.4 Material particulado (PM₁₀ e PM_{2,5})

A matéria particulada é um termo que abrange uma vasta gama de substâncias químicas que podem ser descritas pelo seu tamanho, mecanismo de formação, origem, composição

química e comportamento atmosférico. A concentração destas partículas na atmosfera varia no espaço, no tempo e em função da sua fonte de emissão.

As partículas finas podem apresentar diâmetros inferiores a $10\ \mu\text{m}$ “ PM_{10} ” e diâmetros inferiores a $2,5\ \mu\text{m}$ “ $\text{PM}_{2,5}$ ”. As partículas podem ser emitidas diretamente para atmosfera ou a partir de processos de oxidação e transformação de substâncias precursoras, sendo denominadas por partículas secundárias. Os principais produtores de partículas secundárias são o dióxido de enxofre (SO_2), óxidos de azoto (NO_x), amoníaco (NH_3) e COVs [89].

Os materiais particulados são emitidos para a atmosfera a partir de uma gama variada de fontes antropogénicas sendo as mais relevantes a queima de combustíveis fósseis, o tráfego rodoviário e certos processos industriais. Inúmeros estudos demonstram que as emissões provenientes do tráfego automóvel resultam diretamente da expulsão de gases do escape dos veículos, do desgaste dos pneus e dos travões. Fontes naturais como vulcões e fogos florestais podem também ser importantes fontes de emissão de material particulado. O facto de Portugal ser um país com clima seco favorece o efeito de suspensão de partículas no ar.

As medições executadas historicamente baseiam-se numa medida de peso total de partículas em suspensão (TSP). No Reino Unido, a medição tem sido baseada na quantidade de fumo negro presente na atmosfera. A mesma técnica é utilizada na Rede Urbana Automática (AURN) e nas redes de monitorização da Diretiva da União Europeia [5]. O método consiste em “aspirar” o ar e medir a escuridão através de um filtro de papel branco por meio de um refletómetro. O método é definido pelas normas britânicas (BSI, 1969) [90].

A Figura 2.28 exhibe a evolução da média anual de PM_{10} na região de Lisboa e Vale do Tejo, concluindo-se que as concentrações de PM_{10} diminuíram significativamente, não ultrapassando o valor limite em vigor (linha vermelha) desde meados de 2012. Ainda assim, as concentrações de partículas continuam a representar um risco significativo para a saúde da população residente nesta área.

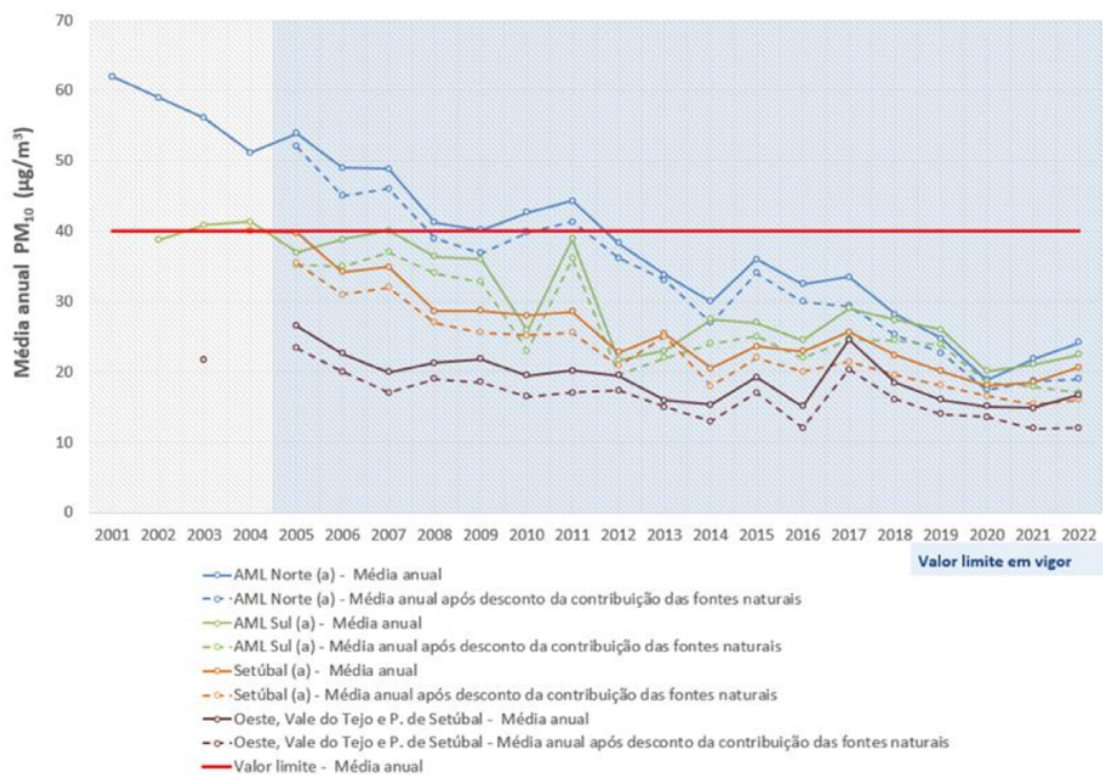


Figura 2.28 - Evolução da média anual de PM10 nas zonas da RLVT [70]

As partículas em suspensão podem ser um veículo de transporte eficaz para poluentes que se fixem às suas superfícies, especialmente hidrocarbonetos e metais pesados. Estes poluentes são transportados até aos pulmões onde podem ser absorvidos, representando um risco para a saúde humana. Os níveis elevados de PM_{10} e $PM_{2,5}$ em ambientes interiores possibilitam o aparecimento de sintomas semelhantes a asma [91]. Problemas como bronquites respiratórias e cancro do pulmão são outros possíveis efeitos nocivos para a saúde humana [92].

A sujidade (Figura 2.29), como já referido anteriormente, é um efeito visual resultante do escurecimento das superfícies dos materiais na consequência da deposição e acumulação de partículas atmosféricas. A perceção pública de diferentes padrões de sujidade simulados em elementos arquitetónicos simples, como fachadas foi estudada por Grossi e Brimblecombe. O objetivo foi perceber como a distribuição e as características da sujidade afetam a aceitabilidade estética dos edifícios. O estudo concluiu que a aceitação estética não é apenas influenciada pelo nível total de sujidade, mas também pela maneira como está distribuída [93]. No entanto o aumento da frequência de limpeza, lavagem ou repintura de superfícies torna-se economicamente dispendioso e pode reduzir a vida útil dos materiais [94]. Esta problemática agrava-se quando se trata de edifícios históricos e com necessidade preservação temporal. O projeto europeu MULTI-ASSESS mediu a sujidade e os padrões de corrosão num determinado conjunto de localizações [95]. Os resultados afirmam que existe uma variabilidade na sujidade dependendo do clima e características da poluição do local de medição.



Figura 2.29 - Deposição de material particulado em edifícios [93]

A libertação de partículas por parte dos materiais de construção tais como o betão e cimento pode também contribuir para a degradação de peças de arte. Toishi desenvolveu estudos com o objetivo de perceber este tipo de impacto. A principal conclusão a ser evidenciada prende-se com o facto das partículas libertadas por estes materiais serem suficientemente alcalinas para causar estragos neste tipo de peças, reagindo com as tintas e sedas utilizadas [96].

2.4 Enquadramento legal e normativo

O principal objetivo deste subcapítulo é fornecer ao leitor informação sobre algumas normas que afetam a ventilação e qualidade do ar interior, bem como a conservação do património histórico.

2.4.1 ASHRAE 62.1 / 2015 ASHRAE Handbook

O principal objetivo desta norma é definir taxas mínima de ventilação com o objetivo de proporcionar parâmetros aceitáveis de qualidade do ar interior para os ocupantes. São definidos requisitos para conceção, instalação, operação e manutenção de sistemas de ventilação e limpeza do ar. A aplicação regulamentar destina-se a construção nova e a edifícios existentes, especificando alterações necessárias no segundo caso. A norma baseia-se em contaminantes químicos, físicos e biológicos que podem impactar a qualidade do ar interior. Na versão atual, a ASHRAE 62.1-2019 apresenta três procedimentos base para cumprir os requisitos presentes na norma; *"IQA Procedure, Ventilation Rate Procedure and Natural Ventilation Procedure"*.

As taxas de admissão de ar exterior, recorrendo ao *The Ventilation Rate Procedure*, são determinadas tendo por base o nível de ocupação, tipo de aplicação e área de pavimento do espaço. As taxas mínimas baseiam-se na concentração de contaminantes e no tipo de fonte de emissão. O caudal exterior que é necessário introduzir no espaço, não deve ser inferior ao valor definido pela equação (2.15):

$$V_{bz} = R_p \times P_z + R_a \times A_z \quad (2.15)$$

Em que:

- R_p – Ventilação necessária por pessoa;
- P_z – Número de ocupantes no compartimento analisado;
- R_a – Ventilação necessária por área do compartimento;
- A_z – Área do compartimento analisado.

Diversos estudos evidenciam que é relativamente fácil poluentes aéreos penetrarem em todos os tipos de edifícios, mesmo quando são edifícios dotados de ventilação mecânica, mas que não apresentam um filtro que consiga remover substâncias químicas [97]. O relatório ASHRAE 2015 apresenta um resumo com as principais fontes de poluentes bem como os seus valores limite no que diz respeito a museus, galerias, arquivos e bibliotecas [98].

A Tabela 2.7 pretende apresentar apenas os poluentes exteriores que causam impacto no interior destes locais. É importante ressaltar que os poluentes interiores devem também ser tidos em conta, mas o principal objetivo da presente dissertação recai sobre a análise de poluentes exteriores.

Tabela 2.7 - Valores limite para poluentes aéreos ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). (Adaptado de: [99])

| Principais Poluentes Exteriores em Museus | Sugestão de concentrações limite | | Recomendações QAI | Concentrações limite de referência | |
|---|----------------------------------|--------------------|----------------------|------------------------------------|----------|
| | Materiais Sensíveis | Coleções Genéricas | Bibliotecas e Museus | Zonas Urbanas | OMS |
| Dióxido de Azoto | <5 | 4-20 | 5 | 4-65 | 62 (8h) |
| Ozono | <0.1 | 1-20 | 4 | 130-290 | 60 (8h) |
| Dióxido de Enxofre | <0.1-1 | 1-5 | 3 | 5-250 | 10 (24h) |
| Material Particulado | <0.1 | 1-10 | - | - | - |

O *IQA Procedure* recorre a uma análise das fontes de poluentes e limites de concentração para determinar as taxas necessárias de admissão de ar exterior. É apresentada uma fórmula que pretende concluir se os valores de concentrações são excedidos no espaço interior. A equação (Equação 2.16) recorre a um somatório de rácios entre a concentração da substância

e o valor limite da mesma. Caso a soma de todas as parcelas seja superior à unidade, considera-se que o limite de concentração foi excedido.

$$\frac{C_1}{T_1} + \frac{C_2}{T_2} + \dots + \frac{C_n}{T_n} \quad (2.16)$$

Em que:

- C_i – Concentração da substância
- T_i – Limite definido para a substância

Uma determinada área de pavimento a ser ventilada com recurso ao *Natural Ventilation Procedure* deve ter em conta a relação entre a geometria do espaço e o posicionamento de aberturas, tendo em conta o pé direito do edifício.

- Abertura unilateral: para sistemas com base em aberturas localizadas numa só fachada é definida uma profundidade máxima de área a ventilar igual a duas vezes a altura do pavimento ao teto;
- Abertura dupla: no caso de existirem aberturas posicionadas em fachadas opostas (ventilação cruzada) a distância máxima entre aberturas é definida por cinco vezes o pé direito;
- Aberturas de canto: para espaços que apresentem aberturas em dois lados adjacentes ou seja, duas aberturas num canto, o maior afastamento possível entre aberturas é de cinco vezes a distância de uma linha traçada entre as duas aberturas mais afastadas.

Na Tabela 2.8 exibem-se as renovações horárias mínimas recomendadas para museus, galerias e igrejas indicadas no documento em análise no presente subcapítulo. Reitera-se que os valores presentes na Tabela 2.8 não são estritamente obrigatórios, mas sim uma recomendação proposta pelo documento podendo existir variações/oscilações desses valores na literatura disponível.

Tabela 2.8 - Taxas horárias mínimas de ventilação. (Adaptado de: [99])

| Categoria de Edifício | Fluxo de ar por área de pavimento | Fluxo de ar por ocupante |
|-----------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| | (m ³ /(h.m ²)) | (m ³ /(h.ocupante)) |
| Museu/galeria | 1.08 | 13.7 |
| Locais religiosos | 1.08 | 9 |

2.4.2 CIBSE Guide A

O CIBSE Guide A refere três métodos com vista à determinação das taxas de fornecimento de ar exterior, tendo em conta aplicações específicas [49].

O primeiro método procura estabelecer uma taxa de fornecimento de ar exterior por cada ocupante ou uma taxa de renovação de ar, consoante a aplicação. É possível fornecer uma determinada quantidade de ar exterior com base no número de ocupantes presentes num determinado espaço. Os valores assumidos nesta secção são baseados em estudos realizados em câmaras nos quais foram excluídos todos os odores à exceção do corporal de cada ocupante e/ou do fumo produzido por cigarros. Por esta razão, as taxas de renovação de ar prescritas, podem subestimar as necessidades de renovação de ar recorrendo a ar exterior se existir predominância de outras fontes de odores para além das enunciadas anteriormente. Para museus e igrejas, o valor recomendado é de 10 L/s.ocupante (36 m³/h.ocupante) no que diz respeito ao caudal de ar necessário para que se obtenham parâmetros elevados de QAI.

O segundo método deve ser utilizado em casos que se conheçam as fontes emissoras de poluentes e o ritmo a que são emitidos. Para que seja possível a aplicação deste método é imperativo ter conhecimento dos limites adequados para determinado poluente. A estratégia de ventilação deve estar assente numa avaliação de risco ao abrigo dos Regulamentos sobre o Controlo de Substâncias Perigosas para a Saúde [99]. Este documento sugere dois tipos de controlo de emissões.

- **Controlo em condições estacionárias**

Para casos em que os poluentes são emitidos a um ritmo constante, a taxa de ventilação prevista para evitar a concentração média ultrapasse um determinado valor limite pode ser calculada pela seguinte equação (Equação. 2.17):

$$Q = \frac{P \times (10^6 - C_{pi})}{E_v \times (C_{pi} - C_{po})} \quad (2.17)$$

Em que:

- Q – Taxa de admissão de ar exterior (L/s);
- P – Taxa de emissão de poluentes (L/s);
- E_v – Eficácia do sistema de ventilação;
- C_{pi} – Concentração do poluente no interior (ppm);
- C_{po} – Concentração do poluente no exterior (ppm).

Um valor de E_v igual a 1 indica uma concentração uniforme em todo o espaço. Caso a estratégia de ventilação não proporcione concentrações uniformes do poluente, deve ser revista e aumentada acima do valor calculado pela equação acima.

- **Controlo em condições não estacionárias**

O volume do compartimento em estudo tem uma influência fundamental na previsão do comportamento dos poluentes e do tempo necessário para efetuar uma ventilação que consiga equilibrar as condições interiores. Este facto torna-se particularmente relevante quando as emissões ocorrem num período limitado. Nestes casos, a estimativa de fornecimento de ar exterior é largamente superior à fornecida pela equação (Equação 2.18).

O rácio para a redução da taxa de ventilação em estado estacionário pode ser obtido através da utilização do diagrama apresentado na Figura 2.30.

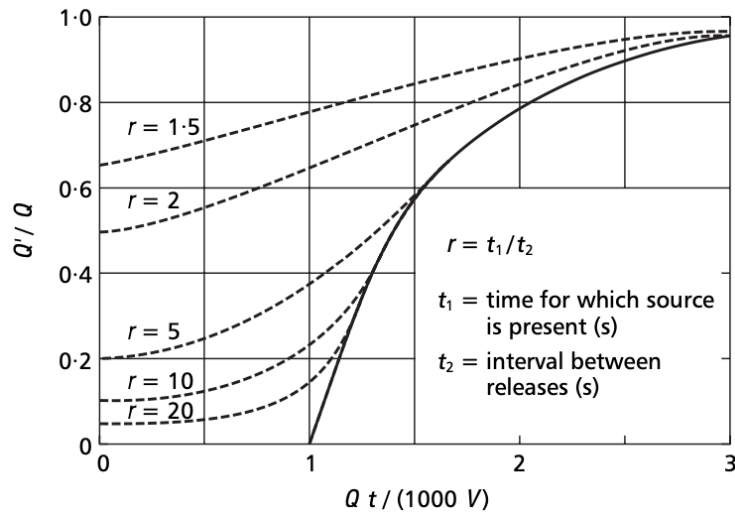


Figura 2.30 - Redução da taxa de ventilação com recurso a ar exterior para uma fonte de poluição variável [49]

$$\frac{Q'}{Q} = f\left(\frac{Q \times t}{1000 \times V}\right) \quad (2.18)$$

Em que Q' corresponde à taxa de ventilação reduzida ($L \cdot s^{-1}$), Q à taxa de ventilação em estado estacionário ($L \cdot s^{-1}$), t a duração da emissão do poluente (s) e V ao volume do compartimento (m^3). A linha a negrito na Figura 2.30 serve de aproximação gráfica ao rácio de redução da taxa de ventilação. Caso o rácio de redução de caudal de ventilação apresente um valor numérico inferior à unidade e, teoricamente, não apresentar é necessidade de qualquer redução, deve ser prevista alguma ventilação devido a possíveis emissões subsequentes de poluentes.

É sugerido um terceiro método para obter taxas de ventilação que se destina a ser utilizado quando as fontes de poluição são conhecidas e identificadas, mas por outro lado, as taxas de emissão de poluentes não conseguem ser previstas e as concentrações limite não são conhecidas [100]. Embora o fornecimento de ar exterior recorrendo a este método seja superior comparativamente com os dois descritos anteriormente, este método não é aplicado, isto

deve-se à falta de aprovação por parte da comunidade internacional aquando da elaboração do documento CIBSE Guide A.

2.4.3 PD CR 1752

O objetivo deste relatório prende-se com a necessidade de definição de parâmetros que proporcionem um ambiente interior aceitável para os ocupantes em edifícios ventilados, especificando métodos de conceção, operação e controlo dos sistemas de ventilação do edifício.

Neste documento são referidas como fontes de poluição do ambiente interior de um edifício os ocupantes e as suas atividades, materiais como mobiliário, produtos domésticos, revestimentos interiores e sistema de ventilação (considerando que admite ar exterior poluído). Divide-se a emissão de poluentes em duas grandes categorias, poluição química e sensorial. Explicita-se que a ventilação necessária de um edifício está diretamente dependente da qualidade do ar exterior. A Tabela 2.9 apresenta exemplos de níveis característicos da qualidade do ar exterior bem como poluentes típicos do ar exterior [101].

Tabela 2.9 - Sugestões de níveis da qualidade do ar. (Adaptado de PD CR 1752: [102])

| Poluentes Aéreos | | | | | | |
|----------------------------|----------------------|---|--|---------------------------------------|---|---|
| | Qualidade do Ar (dp) | Dióxido de Carbono (mg/m ³) | Monóxido de Carbono (mg/m ³) | Dióxido de Azoto (µg/m ³) | Dióxido de Enxofre (µg/m ³) | Material Particulado (µg/m ³) |
| Excelente | 0 | 680 | 0 - 0,2 | 2 | 1 | <30 |
| Boa qualidade do ar | <0,1 | 700 | 1 - 2 | 5 - 20 | 5 - 20 | 40 - 70 |
| Má qualidade do ar | >0,5 | 700 - 800 | 4 - 6 | 50 - 80 | 50 - 100 | >100 |

A qualidade do ar exterior pode apresentar parâmetros de qualidade muito inferiores aos indicados na Tabela 2.9. Nestes casos, o documento PD CR 1752, afirma que pode existir a necessidade de limpeza do ar antes que este seja admitido no interior do edifício.

A qualidade do ar pode não ser homogênea em todo o espaço a ser afetado pela ventilação, mas o que realmente importa para os ocupantes é a qualidade do ar na zona em que há respiração. Esta falta de homogeneidade do ar num compartimento ou espaço tem um impacto nas necessidades de ventilação do mesmo. Podendo ser expressa através da eficácia da ventilação, ε_v :

$$\varepsilon_v = \frac{C_e - C_s}{C_i - C_s} \quad (2.19)$$

Em que:

- ε_v – Eficácia da ventilação;
- C_e – Concentração de poluição do ar expelido;
- C_s – Concentração de poluição do ar admitido;

- C_i – Concentração de poluição na zona de respiração.

Para além das fontes de poluição, a eficácia da ventilação está dependente de fatores como a localização do edifício, condições de temperatura, quantidade de ar admitido no edifício e posição das aberturas de admissão e exaustão. Em caso de deficiente posicionamento das aberturas surgem zonas de estagnação no interior.

Ao nível de taxas de ventilação necessárias para o conforto e saúde dos ocupantes o documento refere duas expressões de cálculo para cada caso, aplicadas em condições estacionárias.

- **Cálculo da taxa de ventilação tendo por base o conforto dos ocupantes:**

$$Q_c = 10 \times \frac{G_c}{C_{c,i} - C_{c,o}} \times \frac{1}{\varepsilon_v} \quad (2.20)$$

Em que:

- Q_c – Taxa de ventilação necessária para atingir o conforto (l/s);
- G_c – Sensação de poluição por parte dos ocupantes (olf);
- $C_{c,i}$ – Qualidade do ar interior desejada (decipol);
- $C_{c,o}$ – Qualidade do ar exterior admitido no interior (decipol);
- ε_v – Eficácia da ventilação.

- **Cálculo da taxa de ventilação tendo por base a saúde dos ocupantes:**

$$Q_h = \frac{G_h}{C_{h,i} - C_{h,o}} \times \frac{1}{\varepsilon_v} \quad (2.21)$$

Em que:

- Q_h – Taxa de ventilação necessária para a saúde dos ocupantes (l/s);
- G_h - Carga de poluição de uma substância química ($\mu\text{g}/\text{l}$);
- $C_{h,i}$ – Valor-guia da substância química ($\mu\text{g}/\text{l}$);
- $C_{h,o}$ – Concentração exterior da substância química admitida no interior ($\mu\text{g}/\text{l}$);
- ε_v – Eficácia da ventilação.

Os valores tabelados referentes a cada substância poluente constam no anexo E do relatório em análise e podem ser consultados em: [101].

2.4.4 EN 15251

A norma EN 15251 define quatro categorias a adotar tendo em conta a tipologia do edifício, o propósito de utilização e o grau expectável de QAI [10]. O objetivo da EN 15251 é apresentar restrições a documentos anteriores tais como, a EN ISO 7730 e a CR 1752. A norma EN 15251 foi recentemente substituída pela norma EN 16798-1:2019 mantendo o sistema de quatro categorias de avaliação da QAI. A Tabela 2.10 pretende exibir a descrição das quatro categorias presentes na norma EM 15251, variando desde a Categoria I que corresponde a um elevado grau de expectativa, passando pelas Categorias II e III que correspondem a um grau normal de expectativa e aceitável, respetivamente, até à Categoria IV em que os valores devem apenas ser aceites em determinados períodos do ano.

Tabela 2.10 - Descrição das quatro categorias contempladas na norma EN 15251. (Adaptado de: [87])

| Categoria | Explicação |
|---------------|--|
| Categoria I | Elevado grau de expectativa; recomendado para espaços ocupados por pessoas muito sensíveis e com requisitos especiais. |
| Categoria II | Grau normal de expectativa; deve ser utilizado para construção nova e reabilitação. |
| Categoria III | Grau aceitável e moderado de expectativa; deve ser utilizado em edifícios existentes |
| Categoria IV | Valores que não se enquadram nas categorias anteriores. Só deve ser aceite em determinados períodos do ano. |

A norma EN 15251 prevê três métodos para calcular a QAI. O primeiro método entra em conta com as emissões dos seres humanos e componentes do edifício tais como, mobiliários e produtos de limpeza (anexo B1.2 – Calcular a ventilação necessária para a componente humana e adicionar a ventilação necessária para a componente do edifício). A ventilação necessária q_{tot} é obtida pela seguinte equação (Equação 2.22):

$$q_{tot} = n \times q_p + A \times q_b \quad (2.22)$$

Em que:

- n – Número de pessoas no compartimento em análise;
- q_p – Ventilação necessária de acordo com o bio efluente;
- A – área do compartimento em análise;
- q_b – Ventilação necessária de acordo com o grau de poluição expectável por m^2 .

O segundo método estabelece taxas de ventilação por pessoa ou por superfície de pavimento (anexo B.1.3 – Método baseado na taxa de ventilação necessária por pessoa e por m² de superfície de pavimento). Embora as taxas de ventilação por cada fonte de emissão sejam analisadas em separado, a combinação das duas deve ser aplicada. A norma não define como deve ser o procedimento para contabilizar o efeito combinado.

O terceiro método com vista a determinação das taxas de ventilação necessárias baseia-se num balanço de massa e nos critérios necessários para o nível de CO₂. O presente método apresenta falta de valores padrão. Apesar deste facto os valores típicos de CO₂ e respetivas taxas de ventilação necessárias são apresentadas na norma EN 16798-3:2017.

3.1 Caso de estudo

O edifício escolhido para a execução da presente dissertação localiza-se em Lisboa, tendo sido construído na década de 60. Ao nível do processo construtivo e materiais utilizados é importante referir que se trata de uma construção pré-fabricada de betão armado não apresentando qualquer tipo de isolamento térmico. A cobertura foi substituída recentemente, sendo atualmente composta por painéis sandwich (composição de duas chapas de aço galvanizado com isolamento térmico no seu interior).

É proposto que seja definido como um edifício que alberga património de importância histórica e cultural. Foi utilizado o edifício em questão pela disponibilidade de parâmetros importantes tais como: área de abertura e comprimentos das juntas móveis dos vãos envidraçados, coeficientes de descarga, áreas das folgas de portas e coeficientes de pressão na envolvente, permitindo realizar uma análise estruturada e com aplicabilidade real. O edifício em questão é composto por vinte e dois compartimentos. Dos quais onze são salas de exposição, quatro são instalações sanitárias, uma copa e um vestiário. É apresentada na Figura 3.1 a planta do edifício com a respetiva legenda de cada compartimento.

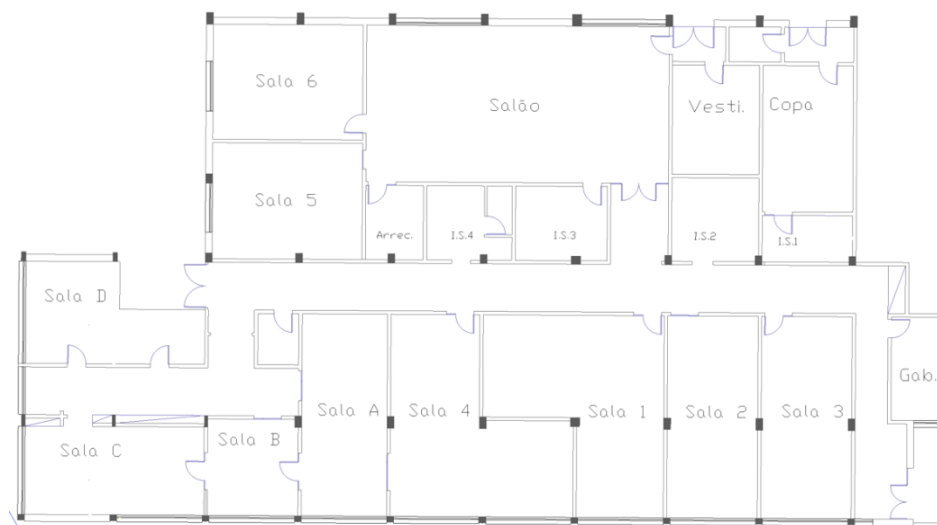


Figura 3.1 – Planta do edifício em estudo

3.2 Clima

O clima de Portugal pode ser genericamente considerado como do tipo temperado marítimo, embora seja possível constatar variações relevantes em função das várias localizações geográficas ao longo do território. Para uma melhor compreensão destas variações e permitir que através do seu conhecimento seja possível obter uma visão mais realista do clima de Portugal, recorre-se ao sistema de classificação climática Köppen.

A classificação principal de Köppen divide o clima da Terra em cinco regiões:

- Clima Tropical Húmido;
- Clima Seco;
- Clima Temperado com Inverno suave;
- Clima Temperado com Inverno rigoroso;
- Clima Polar.

A classificação baseia-se nas temperaturas médias de cada região, à exceção do Clima Seco. O Clima Seco é definido com base em dois fatores, evapotranspiração e precipitação.

O clima de Portugal Continental divide-se em duas regiões principais, segundo a classificação Köppen:

- Csa – clima temperado com Inverno chuvoso e Verão seco e quente;
- Csb – clima temperado com Inverno chuvoso e Verão seco e pouco quente.

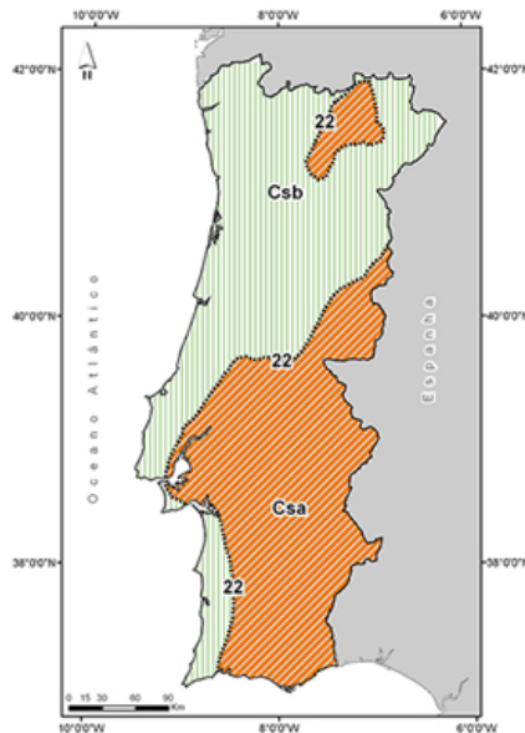


Figura 3.2 - Clima de Portugal continental segundo classificação Köppen [100]

O caso de estudo insere-se na Área Metropolitana de Lisboa, sendo esta área classificada na categoria Csa, conforme ilustrado na Figura 3.2. De acordo com os estudos estatísticos desenvolvidos pela PORDATA, a temperatura média anual do ar em Lisboa apresenta uma tendência crescente ao longo dos últimos 30 anos, como evidenciado na Figura 3.3, em linha com as projeções globais.

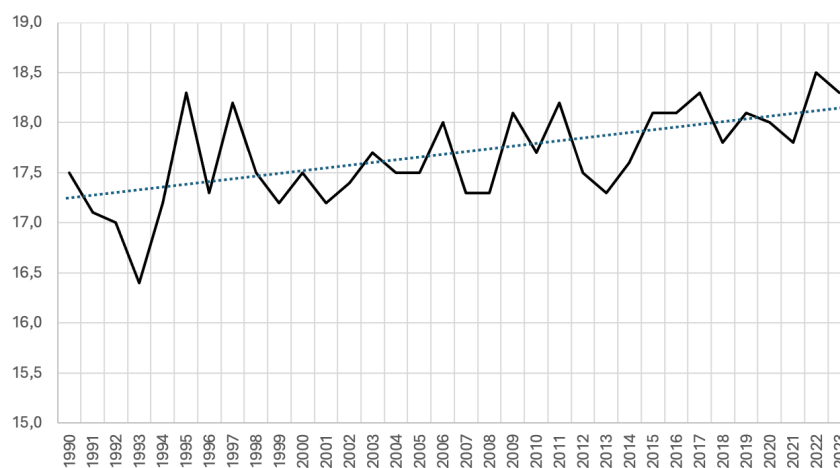


Figura 3.3 - Evolução da temperatura média em Lisboa. (Adaptado de:[116])

O subcapítulo 3.2.1 *Parâmetros de Entrada*, apresenta o ficheiro climático selecionado para representar o clima na região de Lisboa. Este ficheiro serve como base para a execução das simulações descritas nos capítulos subsequentes, permitindo uma análise precisa e contextualizada das condições ambientais que influenciam o desempenho do edifício em estudo

3.2 CONTAM

O Contam é um programa de análise da qualidade do ar interior e ventilação multi-zona desenvolvido pelo National Institute of Standards and Technology (NIST). O *CONTAM* foi concebido para auxiliar a determinação de três parâmetros:

- **Caudais de ar:** taxas de extração/evacuação e caudal de ar de cada compartimento em sistemas de ventilação natural e/ou mecânico.
- **Concentração de Poluentes:** quantificação da dispersão de poluentes transportados pelos fluxos de ar, incluindo transformação química, radioquímica, adsorção e deposição em materiais de construção.
- **Exposição:** previsão da exposição dos ocupantes aos poluentes transportados pelos fluxos de ar para posterior avaliação dos riscos associados. A previsão das concentrações de poluentes pode ser utilizada para determinar o desempenho da qualidade do ar interior dos edifícios ainda em fase de projeto, permitindo a avaliação dos impactos das diversas opções de sistemas de ventilação.

A ferramenta *CONTAM* foi utilizada em inúmeros relatórios científicos pela sua flexibilidade e assertividade de análise [102, 103].

Os primeiros cálculos realizados pelo *CONTAM* consistiram na determinação de taxas de renovação de ar entre compartimentos recorrendo a uma equação de balanço de massa (eq. 3.1):

$$\frac{dm_{\alpha,i}}{dt} = -R_{\alpha,i}C_{\alpha,i} - \sum_j F_{i,j}C_{\alpha,i} + \sum_j F_{j,i}(1 - \eta_{\alpha,j,i})C_{\alpha,j} + m_i \sum_j k_{\alpha,\beta}C_{\beta,i} + G_{\alpha,j} \quad (3.1)$$

Em que:

- $dm_{\alpha,i}$ – Massa de poluente α na zona i (kg);
- $R_{\alpha,i}$ – Coeficiente de remoção para o poluente α na zona i (kg/s);
- $C_{\alpha,i}$ – Massa da concentração de poluente α na zona i (kg/kg);
- $F_{i,j}$ – Fluxo de ar da zona i para a zona j (kg/s);
- $F_{j,i}$ – Fluxo de ar da zona j para a zona i (kg/s);
- $\eta_{\alpha,j,i}$ – Eficiência da filtragem do ar entre a zona j e i (kg/s);
- $C_{\alpha,j}$ – Massa da concentração de poluente α na zona j (kg/kg);
- m_i – Massa de ar na zona i (kg);
- $k_{\alpha,\beta}$ – Coeficiente de reação cinética na zona i entre os poluentes α e β (1/s);
- $C_{\beta,i}$ – Massa da concentração do poluente β na zona i (kg/kg);
- $G_{\alpha,j}$ – Taxa de produção de poluente α na zona i (kg/kg).

O *CONTAM* permite a análise de edifícios com de zonas interligadas entre si, através das quais o ar e os poluentes podem circular. O manual e programa podem ser descarregados através do website dedicado [104].

3.2.1 Parâmetros de entrada

A introdução de dados envolve a determinação e análise de valores numéricos associados a cada variável presente no programa. As variáveis representam o modelo do edifício, elementos de ventilação e fontes de contaminantes. Cada variável é associada a um certo número de parâmetros de introdução obrigatória, pelo que é necessário obter valores de modo a realizar a sua introdução no programa. Em diversos casos é necessária uma interpretação criteriosa dos resultados por forma a validar ou não os resultados obtidos.

Estimar uma representação coerente do comportamento da qualidade do ar interior e da ventilação dos compartimentos interiores requer a adoção de parâmetros de entrada

fiáveis. Por este motivo, este subcapítulo apresenta os valores introduzidos e a sua origem, de modo a simplificar o processo de análise e revisão por parte do leitor.

3.2.1.1 Ficheiro climático

O ficheiro climático utilizado como referência para as simulações realizadas consiste num conjunto de dois arquivos desenvolvidos pelo Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI). O ficheiro agrupa dados sintéticos baseados na interpolação espacial de dados climáticos públicos cedidos pelo Instituto de Meteorologia conjugados com dados disponibilizados pelo INETI. O ficheiro pode ser obtido através da base de dados *EnergyPlus*, gerida pelo *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*. O *EnergyPlus* é um programa de simulação energética para edifícios.

Preferencialmente, os registos meteorológicos devem ser recolhidos no local de modo a obter valores mais precisos do comportamento de parâmetros como temperaturas interiores, exteriores e renovação de ar. Esta tipologia de medição não é possível efetuar, portanto a temperatura interior foi fixada em 20°C, valor base nos exemplos disponibilizados pelo NIST.

Os dados existentes no ficheiro utilizado são uma composição dos valores médios registados ao longo de 30 anos podendo ser descarregados através do link [105]. A Figura 3.4 exhibe a variação anual de temperatura em Lisboa de acordo com a base de dados climáticos do programa *EnergyPlus*.

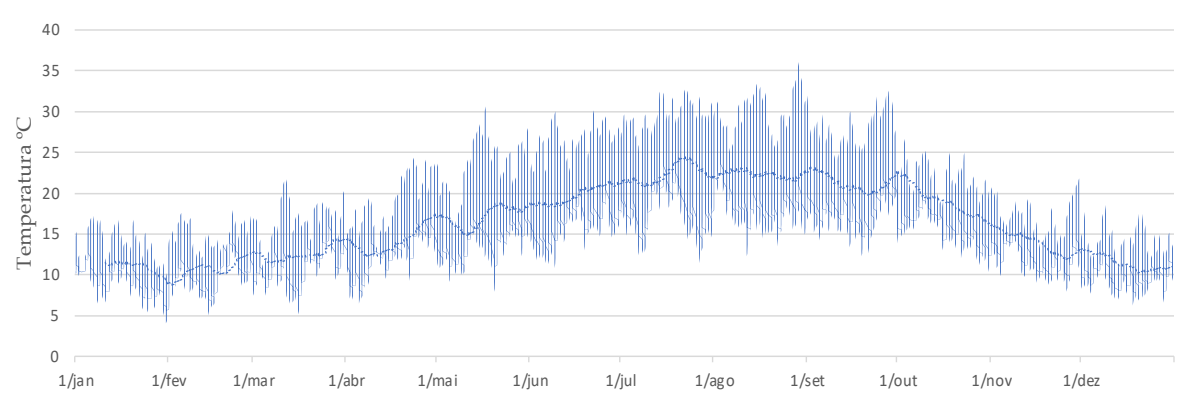


Figura 3.4 - Variação de temperatura anual em Lisboa. (Adaptado de:[105])

3.2.1.2 Fontes e modelos de poluentes

O CONTAM disponibiliza uma ampla diversidade de modelos para introdução das taxas de produção e disseminação de poluentes no ar no interior do edifício. O programa não contempla a possibilidade de criação de uma fonte de produção de poluentes no exterior do edifício. É possível contabilizar as variações das concentrações de poluentes exteriores efetuando simulações em regime transiente recorrendo à criação de um ficheiro de poluentes exteriores (.CTM). Os poluentes presentes nas simulações decorrem do estudo executado no

Capítulo 2.3 da presente dissertação. No presente estudo utilizou-se por base a interpolação de valores horários recolhidos ao longo do ano de 2022 nas estações de medição de Entrecampos, Olivais e Avenida da Liberdade. As Figuras 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9 exibem as concentrações médias mensais de cada poluente para visualizar a variação anual da concentração de cada poluente.

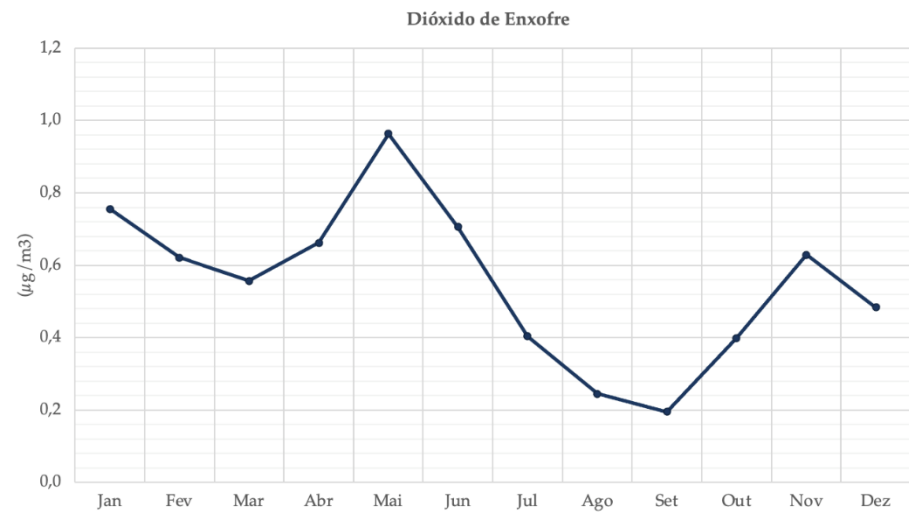


Figura 3.5 - Concentração média mensal de Dióxido de Enxofre

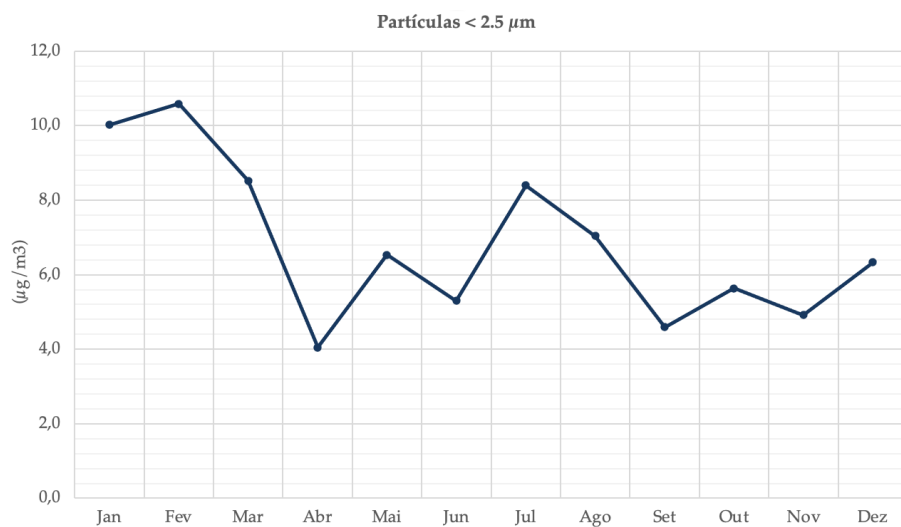


Figura 3.6 - Concentração média mensal de PM2.5

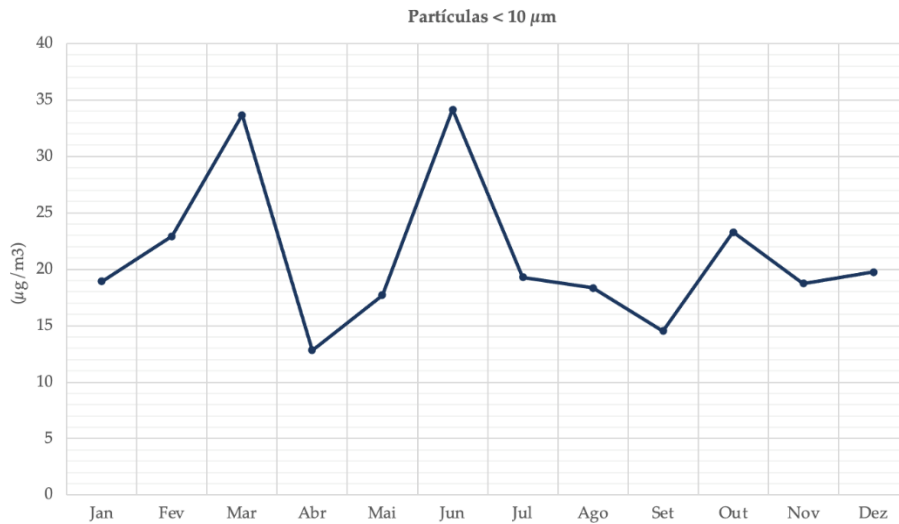


Figura 3.7 - Concentração média mensal de PM10

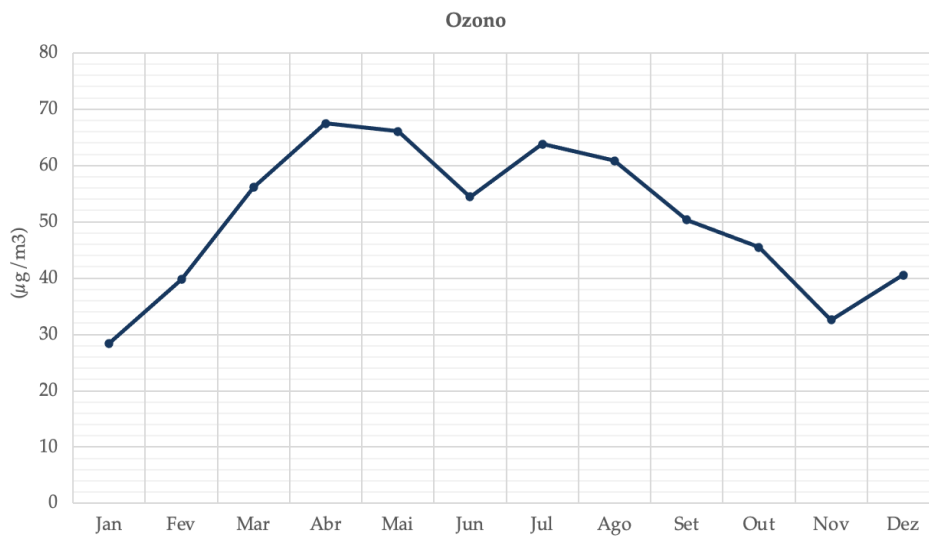


Figura 3.8 - Concentração média mensal de Ozono

Como visto anteriormente, o ozono apresenta maiores taxas de concentração em períodos em que a radiação ultravioleta é mais intensa. É perceptível pela Figura 3.8 que existe um aumento substancial das concentrações de ozono no período de maior intensidade de radiação ultravioleta.



Figura 3.9 - Concentração média mensal de Dióxido de Azoto

A Tabela 3.1 resume as concentrações médias mensais de cada poluente apresentadas ao longo deste subcapítulo com o objetivo de proporcionar uma consulta mais rápida e precisa.

Tabela 3.1 - Concentrações médias mensais de poluentes

| | Dióxido de Enxofre | Partículas < 10 µm | Ozono | Dióxido de Azoto | Partículas < 2.5 µm |
|------------|--------------------|--------------------|-------|------------------|---------------------|
| Jan | 0,76 | 18,91 | 28,42 | 36,04 | 10,02 |
| Fev | 0,62 | 22,91 | 39,75 | 45,24 | 10,59 |
| Mar | 0,56 | 33,66 | 56,13 | 30,38 | 8,52 |
| Abr | 0,66 | 12,82 | 67,44 | 25,09 | 4,04 |
| Mai | 0,96 | 17,70 | 66,03 | 28,88 | 6,53 |
| Jun | 0,71 | 34,15 | 54,40 | 15,42 | 5,30 |
| Jul | 0,40 | 19,28 | 63,81 | 28,01 | 8,40 |
| Ago | 0,25 | 18,35 | 60,87 | 20,33 | 7,04 |
| Set | 0,20 | 14,53 | 50,31 | 28,06 | 4,60 |
| Out | 0,40 | 23,29 | 45,50 | 38,62 | 5,63 |
| Nov | 0,63 | 18,75 | 32,62 | 46,23 | 4,91 |
| Dez | 0,48 | 19,73 | 40,58 | 38,76 | 6,34 |

Para além da introdução do ficheiro (.ctm), estabelecendo as concentrações de poluentes no exterior do edifício, é necessário introduzir alguns dados relativos a cada grupo de poluentes (gasosos e particulados). A Tabela 3.2 resume os parâmetros de entrada necessários para execução da sua caracterização no programa e posterior contabilização nas simulações realizadas.

Tabela 3.2 - Parâmetros de entrada referentes aos poluentes em estudo

| | Dióxido de enxofre (SO ₂) | Ozono (O ₃) | Dióxido de azoto (NO ₂) | PM _{2.5} | PM ₁₀ |
|--|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------|------------------|
| Massa Molar (kg/kmol) | 64.06 | 48 | 46.01 | - | - |
| Diâmetro Médio (µm) | - | - | - | 2.5 | 10 |
| Densidade Efetiva (g/cm ³) | - | - | - | 1 | 2 |

Relativamente ao material particulado (PM10 e PM2.5), implementaram-se taxas de deposição em todos os compartimentos do edifício correspondentes a 0,2h⁻¹. A Figura 3.10 permite visualizar a interface do programa após a introdução deste parâmetro, o qual é de importância elevada dado que o material particulado tende a depositar-se nas superfícies dos diversos materiais presentes no interior de qualquer edifício, o que pode apresentar impactos significativamente negativos na qualidade do ar interior e na degradação de material histórico existente no interior de um museu.

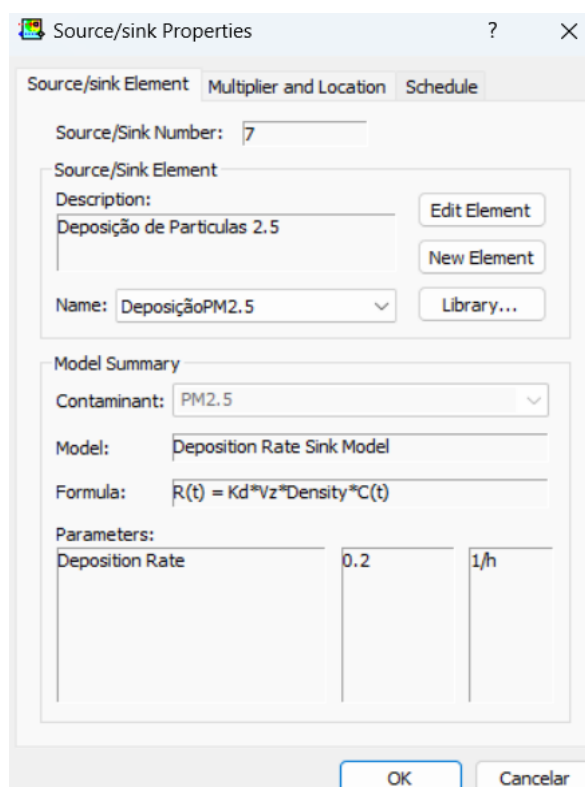


Figura 3.10 - Interface do programa taxa de deposição do PM2.5

Esta abordagem permite uma simulação mais realista e precisa do comportamento dos poluentes particulados, refletindo a tendência natural de acumulação em superfícies. A consideração de taxas de deposição permite assegurar que os resultados obtidos são mais representativos das condições reais.

3.2.1.3 Geometria do modelo

O modelo utilizado tem por base um edifício existente localizado em Lisboa. Trata-se de um edifício térreo com elevada compartimentação interior favorecendo a análise que se pretende realizar. Na Figura 3.11 representa-se geometria do modelo introduzido no programa.

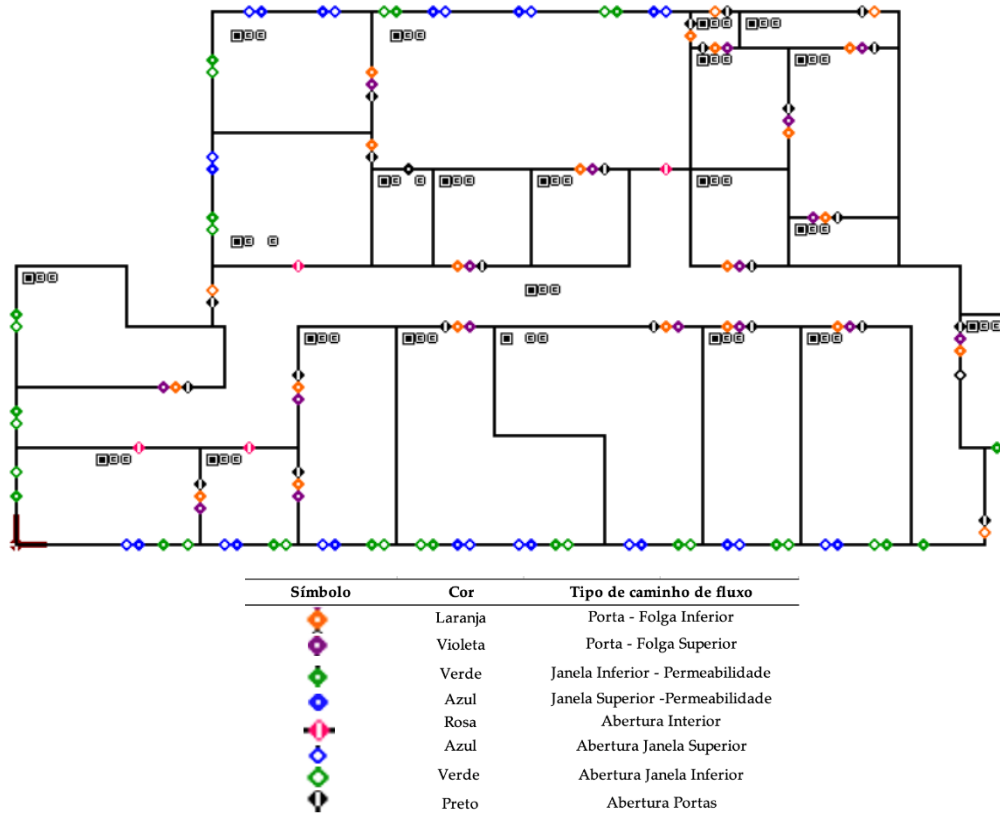


Figura 3.11 - Modelo introduzido no CONTAM

O tipo de geometria é compatível com o programa CONTAM visto que os parâmetros de volume e localização de aberturas na envolvente são facilmente introduzidos. A orientação do vento predominante ocorre na fachada noroeste (NO), como é possível visualizar através da Figura 3.12 realizada no programa AutoCAD para melhor compreensão das orientações referidas.

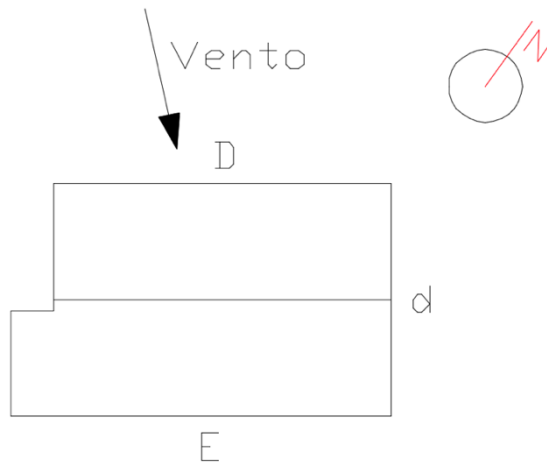


Figura 3.12 - Orientação vento predominante

Na Figura 3.13, é possível visualizar o pé direito do edifício que se divide em dois valores diferentes na fachada sul/sudeste. Os vãos envidraçados posicionados a cotas diferentes constituem um fator extremamente importante para que se consiga analisar e aplicar estratégias de ventilação natural por tiragem térmica, como estudado anteriormente.

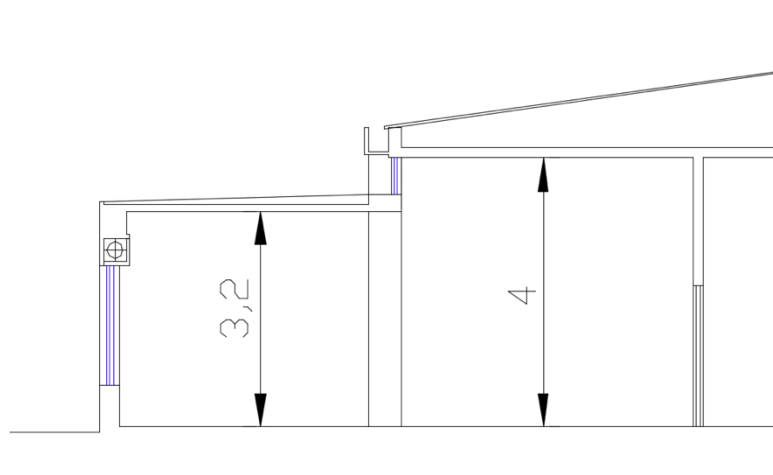


Figura 3.13 - Corte da fachada sul/sudeste

3.2.1.4 Caminhos de fluxo

A definição criteriosa dos caminhos de fluxo disponíveis no modelo é extremamente importante para que se obtenham resultados fidedignos e confiáveis. O programa *CONTAM* oferece uma vasta possibilidade de escolha no que diz respeito aos modelos de escoamento possíveis que fornecem a relação entre o fluxo de ar e a diferença de pressão para os caminhos de escoamento. O modelo escolhido para definir a permeabilidade dos vãos envidraçados recorre a um modelo matemático por forma a determinar o escoamento através deste tipo de nós. A equação 3.1 permite visualizar o modelo matemático adotado:

$$Q = C \times (\Delta P)^n \quad (3.1)$$

Em que C é um coeficiente de fluxo em $\text{m}^3/\text{s}/\text{Pa}^n$ e n um expoente de fluxo. Estudos anteriores não publicados, para além da realização de testes *insitu*, analisaram o comportamento do edifício em túnel de vento determinando um $n_{\text{médio}}$ de 0,541 e um $C_{\text{médio}}$ de 0,001694 $\text{m}^3/\text{s}/\text{Pa}^n$.

As áreas de abertura dos vãos envidraçados são apresentadas de seguida:

- Janela Inferior – 0,405 m^2 ;
- Janela Superior – 0,225 m^2 .

A Figura 3.14 exibe um exemplo da interface do programa para a definição da permeabilidade dos vãos envidraçados.

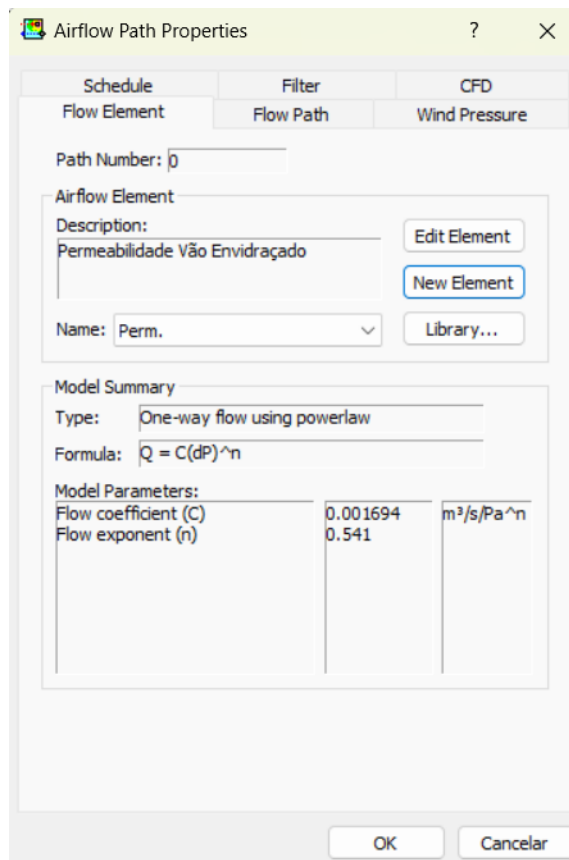


Figura 3.14 - Layout programa modelo de escoamento vãos envidraçados

Os coeficientes de pressão introduzidos foram obtidos em testes efetuados num modelo à escala do edifício com recuso a um túnel de vento. A Figura 3.15 exibe a interface do programa para introduzir os valores dos coeficientes de pressão.

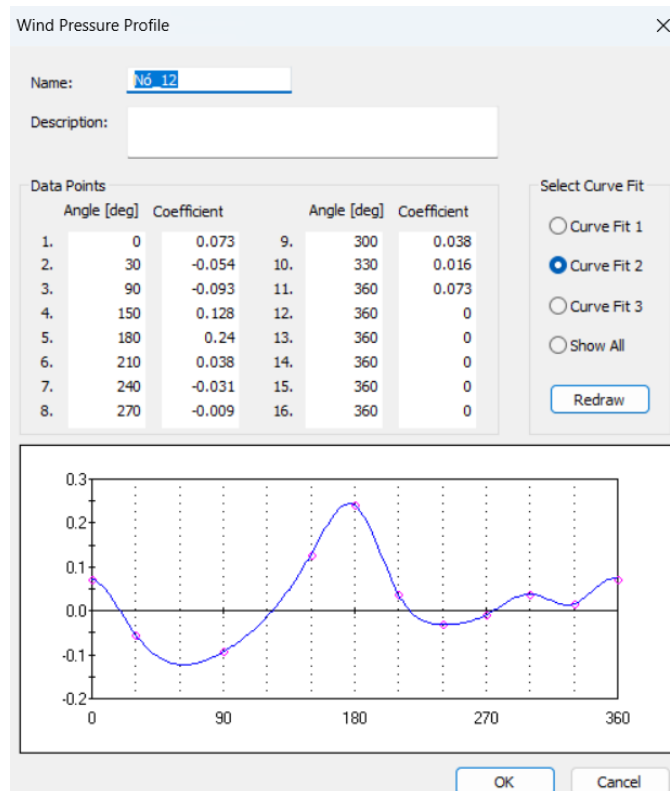


Figura 3.15 - Exemplo de um perfil de pressão (Nó_12)

A medição de folgas superiores e inferiores de portas interiores foram também contabilizadas na execução do modelo. A introdução destes caminhos de escoamento no programa foi realizada através do modelo “Área do Orifício” uma vez que permite a introdução da descrição da abertura. Neste tipo de modelo de escoamento é necessário introduzir os seguintes parâmetros: Área da secção da folga; Coeficiente de descarga (o programa *CONTAM* estabelece um valor de 0,6); Número de Reynolds (o programa *CONTAM* utiliza o valor 30); Diâmetro Hidráulico (a ferramenta *CONTAM* realiza o cálculo mediante a área da secção introduzida); Expoente de Fluxo (Utilizou-se o valor 0,5 sendo que o programa *CONTAM* acontece um valor entre 0,5 e 1,0).

As áreas de folgas de portas apresentam-se de seguida:

- Folga inferior – 60 cm²;
- Folga superior – 12 cm².

Com exceção dos vãos nas paredes de fachada, a envolvente exterior do edifício não apresenta outras aberturas suscetíveis de funcionarem como admissão e/ou exaustão de ar. O exemplo da interface do programa relativamente às folgas introduzidas é apresentado na Figura 3.16.

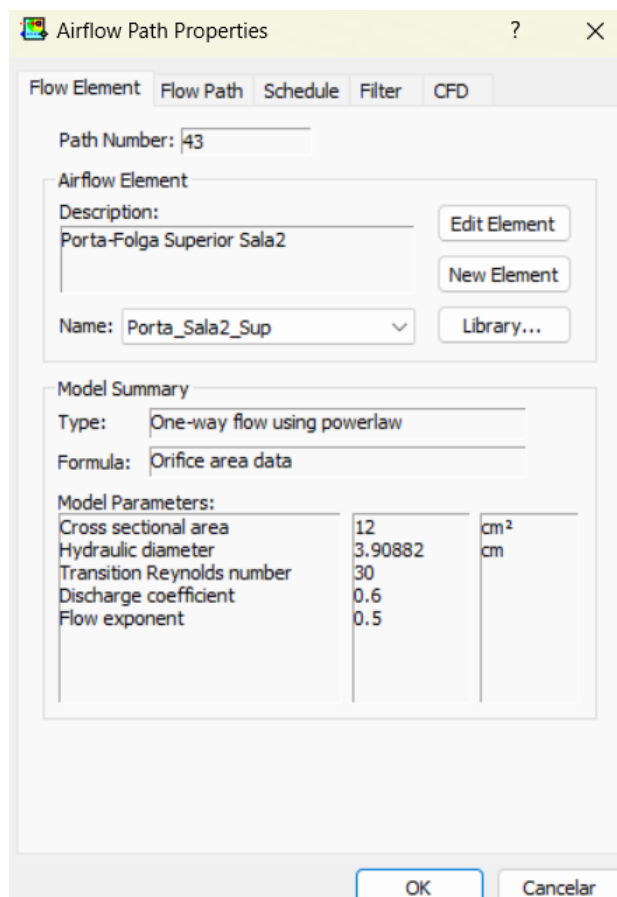


Figura 3.16 - Layout programa modelo de escoamento folgas de portas

3.3 Simulações

O presente subcapítulo pretende introduzir as simulações realizadas no capítulo seguinte. Em primeiro lugar, realizaram-se um conjunto de duas simulações base com o objetivo de avaliar a permeabilidade da envolvente do edifício em estudo, tendo em conta que os valores de comparação e validação para este modelo são limitados. Realiza-se ainda uma simulação (Sim1.3_Base) com o objetivo de introduzir o ficheiro (.ctm) retratando a variação de concentração de poluentes em Lisboa.

De seguida, realizaram-se o conjunto de simulações 2, referentes a diferentes estratégias e/ou mecanismos de ventilação natural com o objetivo de compreender a relação entre cada estratégia e/ou mecanismo de ventilação natural e a entrada de poluentes exteriores no interior do edifício. As taxas de renovação horária obtidas em cada simulação são comparadas

com a norma EN 15251 (ver Tabela 4.3). No que diz respeito à concentração de poluentes é realizada a comparação com o “Índice da Qualidade do Ar” da APA (Tabela 2.6) e com os valores limite sugeridos pela ASHRAE 2015 (Tabela 2.7).

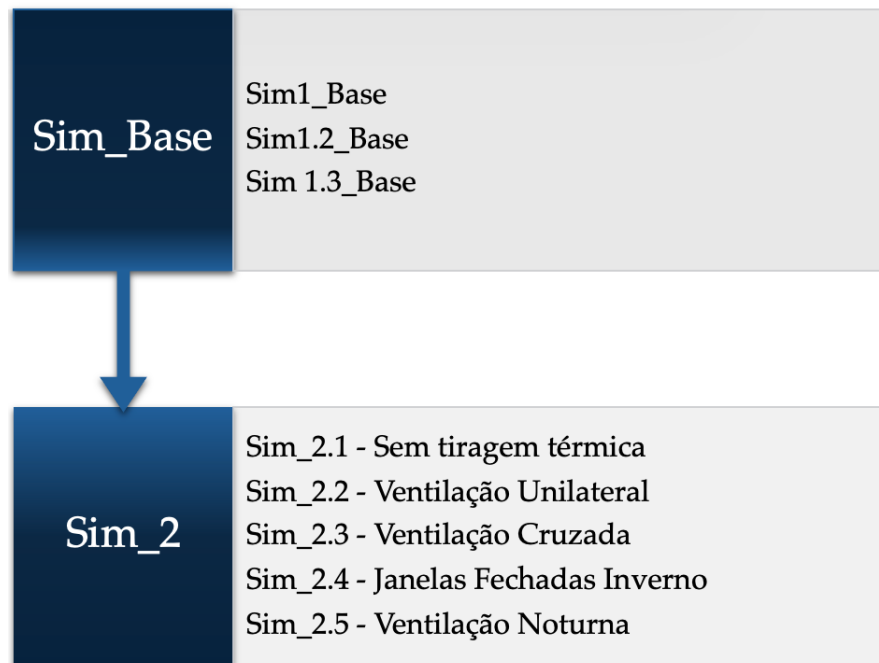


Figura 3.17 - Esquema de simulações

4. Análise e Discussão de Resultados

4.1 Considerações gerais

No presente capítulo pretende-se discutir os resultados obtidos nas simulações conduzidas ao longo do processo de estudo e análise do edifício. São apresentadas comparações com as taxas de ventilação prescritas na norma EN 15251 no que diz respeito às taxas de renovação horária.

4.1.1 Sim1_Base

A primeira simulação executada tem como objetivo avaliar a permeabilidade da envolvente e as renovações horárias do edifício quando os vãos envidraçados e portas (exteriores e interiores) estão fechados. Para tal, foram introduzidos no programa os valores dos coeficientes de descarga de cada vão envidraçado bem como folgas superiores e inferiores das portas interiores e exteriores do edifício. Ressalva-se que os valores introduzidos foram recolhidos e testados com recurso a túnel de vento em estudos anteriores não publicados do edifício, tendo sido disponibilizados para a realização da presente dissertação.

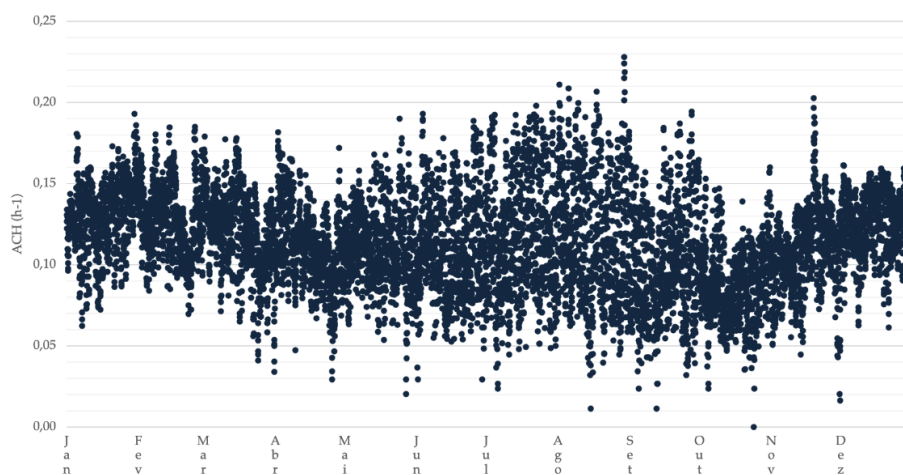


Figura 4.1 - Sim1_Base - Rph horário ao longo de um ano

É possível visualizar na Figura 4.1 que as maiores taxas de ventilação do edifício ocorrem no inverno e no verão. Esta facto pode ser explicado com base em dois mecanismos estudados ao longo da presente dissertação. No inverno, verifica-se uma elevada diferença de temperatura entre o exterior e interior do edifício o que justifica maiores taxas de ventilação promovidas pela tiragem térmica. O pico constatado no verão deve-se ao aumento da velocidade do vento, em Lisboa, nesta altura do ano. As Figuras 4.2 e 4.3 pretendem clarificar estes fatores.

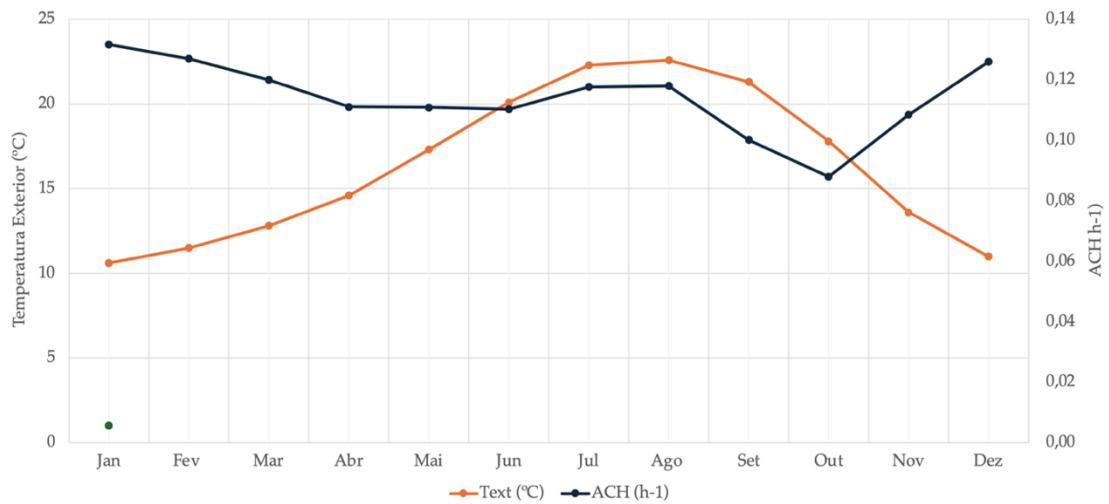


Figura 4.2 - Média temperatura exterior mensal vs média de ACH mensal

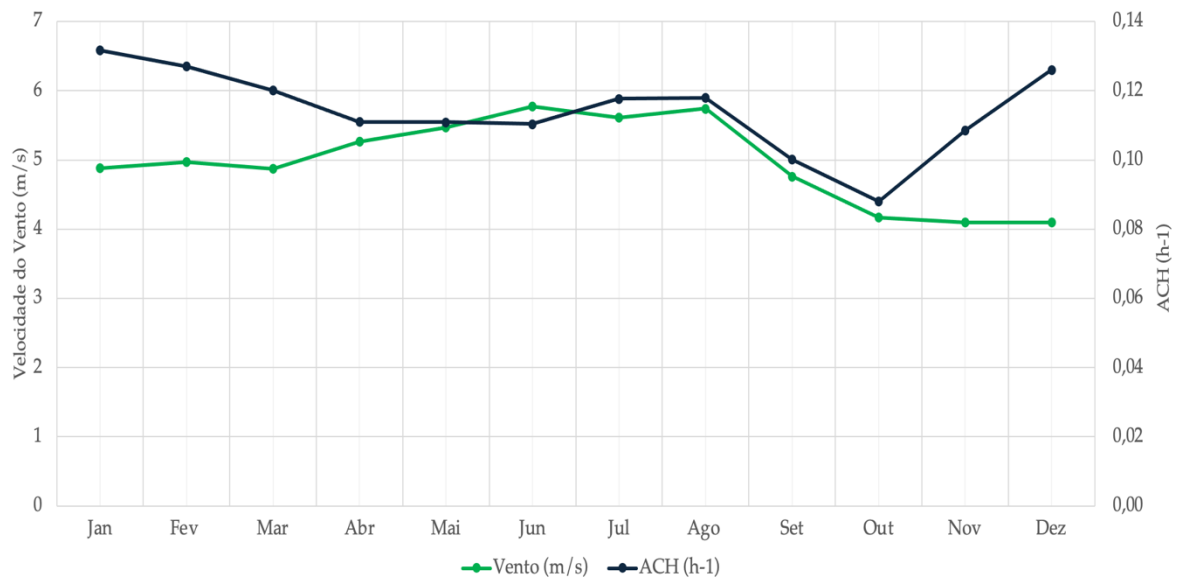


Figura 4.3 - Média da velocidade do vento mensal vs média ACH mensal

É interessante analisar o mês de outubro visto ser o mês que apresenta a taxa de ventilação anual mais baixa. Este fator pode ser justificado pela semelhança das temperaturas

interiores e exteriores condicionante para a ventilação por tiragem térmica e baixas velocidades do vento, reduzindo a ventilação por ação do vento.

A Tabela 4.1 resume as médias apresentadas nos gráficos anteriores para uma visualização mais rápida e clara do leitor, sendo a temperatura exterior designada por *Text*.

Tabela 4.1 - Média mensal de temperatura exterior, velocidade do vento e Rph

| | Text (°C) | Vento (m/s) | Rph (h ⁻¹) |
|-----|-----------|-------------|------------------------|
| Jan | 10,6 | 4,88 | 0,132 |
| Fev | 11,5 | 4,97 | 0,127 |
| Mar | 12,8 | 4,87 | 0,120 |
| Abr | 14,6 | 5,26 | 0,111 |
| Mai | 17,3 | 5,47 | 0,111 |
| Jun | 20,1 | 5,77 | 0,110 |
| Jul | 22,3 | 5,61 | 0,118 |
| Ago | 22,6 | 5,74 | 0,118 |
| Set | 21,3 | 4,76 | 0,100 |
| Out | 17,8 | 4,17 | 0,088 |
| Nov | 13,6 | 4,10 | 0,109 |
| Dez | 11,0 | 4,10 | 0,126 |

Apresenta-se, na Figura 4.4 o esquema dos caminhos de fluxo referente à ventilação para que se consiga analisar as entradas e saídas de caudais de ar disponíveis no modelo analisado. Constata-se que as quatro instalações sanitárias e a copa (Figura 3.1) não apresentam ventilação visto que são interiores e não apresentam qualquer abertura à exceção de folgas superiores e inferiores das portas.

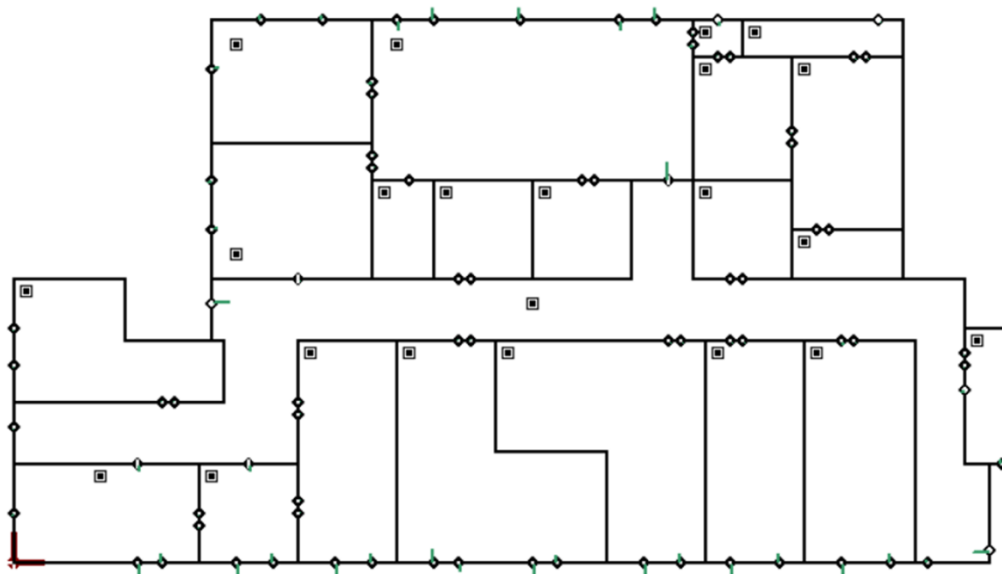


Figura 4.4 - Esquema de fluxos

4.1.2 Sim1.2_Base

No subcapítulo anterior, evidenciou-se que não existe ventilação nas quatro instalações sanitárias e copa. Com vista à resolução deste fator foram adicionadas ao modelo condutas de ligação interior-exterior através da cobertura. A Figura 4.5 exibe a introdução das condutas referidas anteriormente na interface do programa. Os losangos a negrito representam as condutas na cota superior do edifício perfazendo a ligação à cobertura por forma a criar a ligação interior-exterior nestes compartimentos.

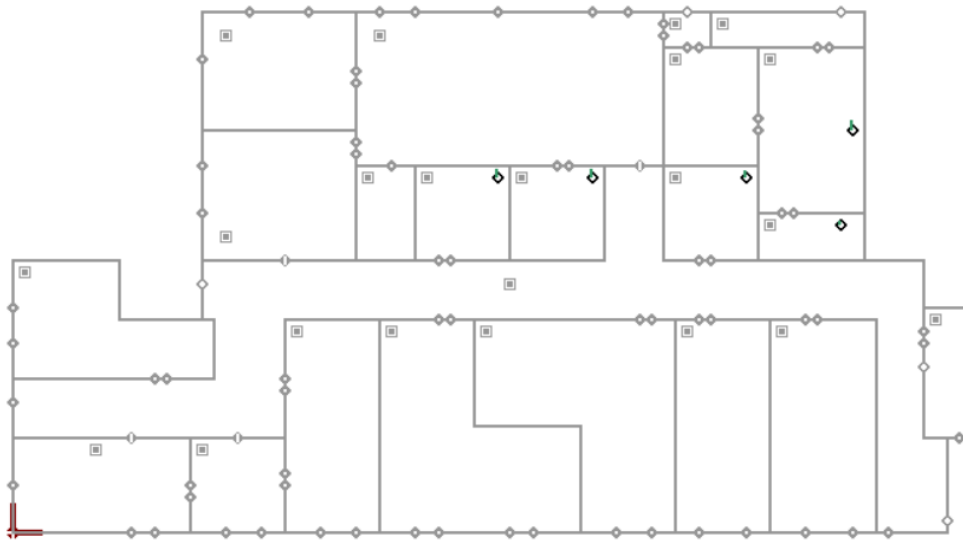


Figura 4.5 - Condutas de ligação à cobertura (losangos a negrito)

Esta medida pretende introduzir ventilação nestes espaços, apresentam-se de seguida os resultados obtidos com recurso a três gráficos (Figuras 4.6, 4.7 e 4.8) e a Tabela 4.2.

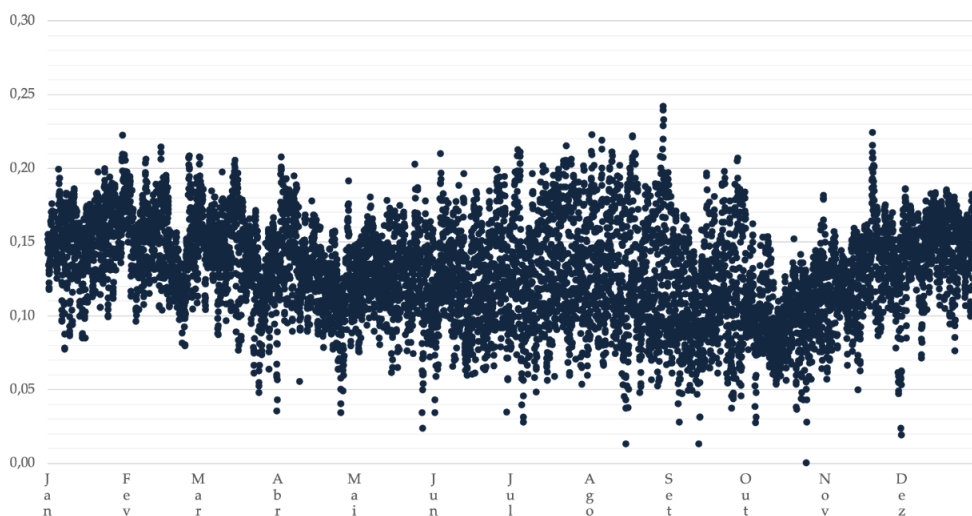


Figura 4.6 - Sim1.2_Base – Rph (h^{-1}) horário ao longo de um ano

Como seria expectável não há variação significativa ao nível da linha de tendência dos valores de Rph uma vez que a única alteração para a Sim1_Base foi a introdução de condutas de ligação ao exterior através da cobertura.

O comportamento ao nível da variação entre temperatura exterior vs Rph e velocidade do vento vs Rph mantém-se muito semelhante à simulação anterior.

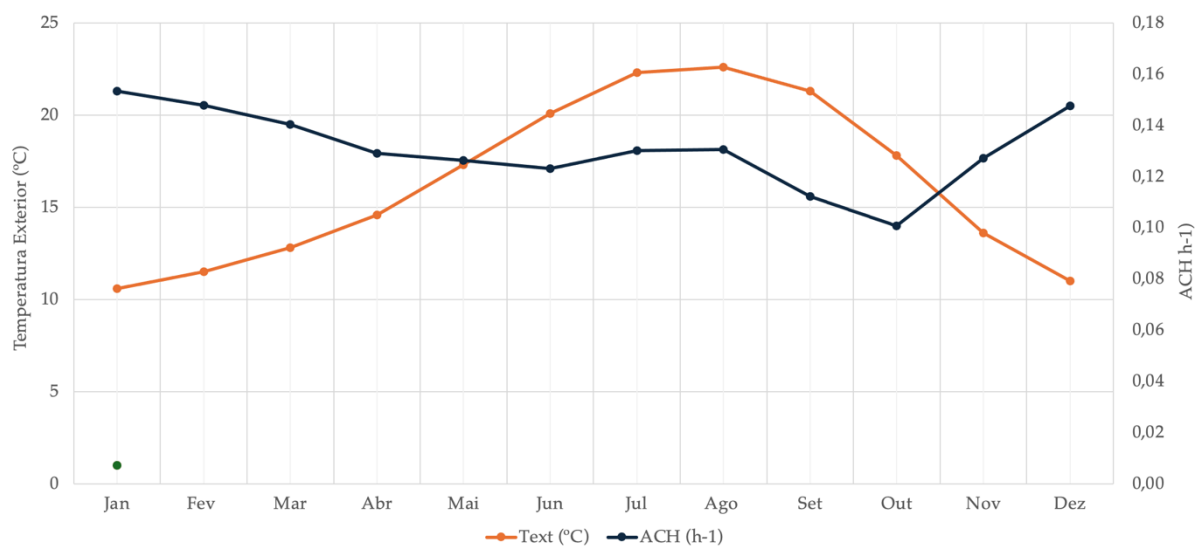


Figura 4.7 - Média da temperatura exterior mensal vs média de Rph mensal

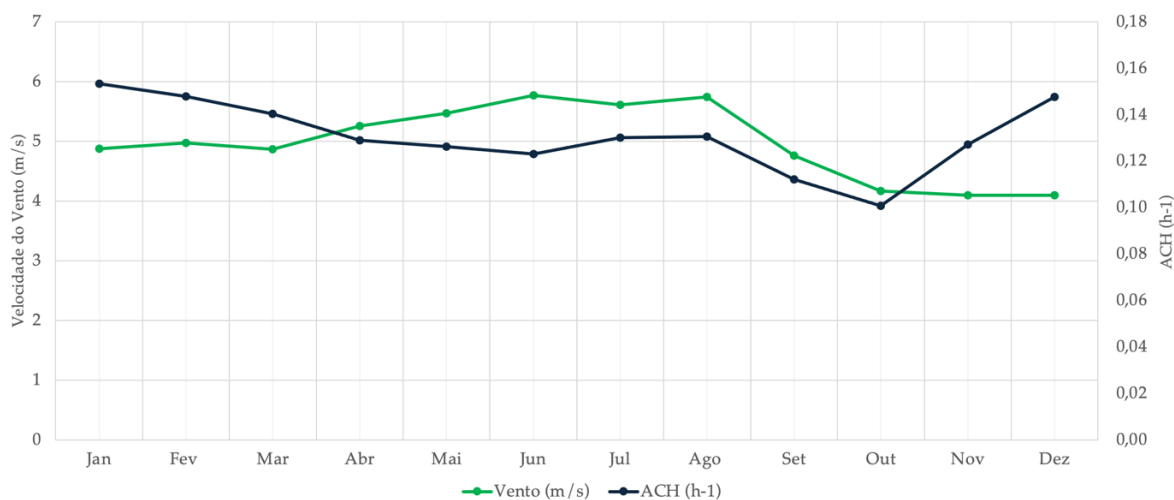


Figura 4.8 - Média da velocidade do vento mensal vs média Rph mensal

Comparando as Tabelas 4.1 e 4.2 é possível concluir que após a introdução de condutas de ligação ao exterior nas quatro instalações sanitárias e copa os valores de Rph aumentaram proporcionando maiores taxas de ventilação no edifício. Conclui-se que as instalações sanitárias e copa apresentam caudais de ventilação, objetivo desta simulação.

Tabela 4.2 - Média mensal de temperatura exterior, velocidade do vento e Rph após introdução das condutas

| | Text (°C) | Vento (m/s) | Rph (h ⁻¹) |
|------------|-----------|-------------|------------------------|
| Jan | 10,6 | 4,88 | 0,153 |
| Fev | 11,5 | 4,97 | 0,148 |
| Mar | 12,8 | 4,87 | 0,140 |
| Abr | 14,6 | 5,26 | 0,129 |
| Mai | 17,3 | 5,47 | 0,126 |
| Jun | 20,1 | 5,77 | 0,123 |
| Jul | 22,3 | 5,61 | 0,130 |
| Ago | 22,6 | 5,74 | 0,131 |
| Set | 21,3 | 4,76 | 0,112 |
| Out | 17,8 | 4,17 | 0,101 |
| Nov | 13,6 | 4,10 | 0,127 |
| Dez | 11,0 | 4,10 | 0,148 |

4.1.3 Sim1.3_Base

A presente simulação (Sim1.3_Base) tem como principal objetivo a introdução de poluentes no modelo apresentado anteriormente. Pretende-se perceber qual a variação anual da concentração da carga de poluentes bem como os períodos mais críticos no interior do edifício sem que se recorra a qualquer estratégia de ventilação natural. Para além disto, através dos resultados obtidos, selecionam-se três compartimentos representativos (Sala 1, Sala D e Salão), para que seja possível realizar uma análise mais concreta e detalhada. A escolha dos compartimentos tem por base a sua localização, concentração interior de poluentes, o facto de apresentarem dimensões razoáveis e terem sido analisados em estudos anteriores não publicados. Posto isto, todos os vãos envidraçados e portas consideram-se fechados tirando apenas partido da permeabilidade e folgas destes elementos, respetivamente.

A Figura 4.9 exhibe as médias mensais da carga dos poluentes em estudo no interior do edifício e no ambiente exterior ao longo do ano. Os valores apresentados têm em conta a soma das concentrações dos cinco poluentes considerados na simulação, uma vez que, não é objetivo analisar o seu comportamento de forma singular. Os subcapítulos seguintes apresentam cada poluente de forma detalhada uma vez que existem poluentes mais problemáticos do que outros pelo que agregar as suas concentrações não é representativo da realidade.

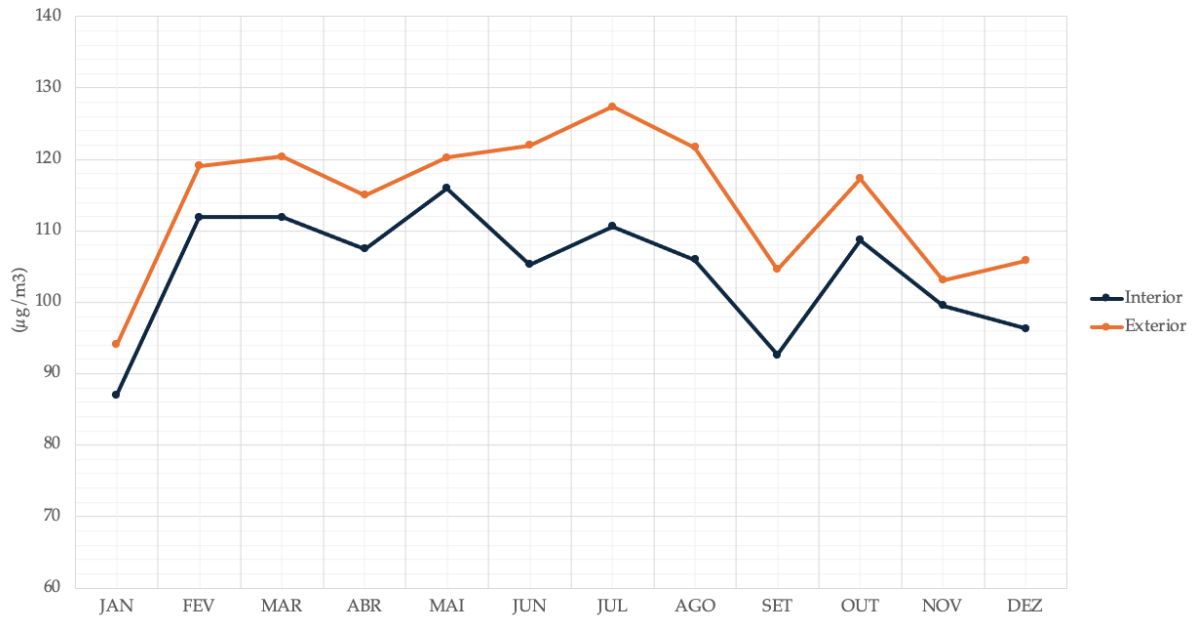


Figura 4.9 - Média mensal da concentração de poluentes ao longo de um ano

Através da Figura 4.9 é possível concluir que o ambiente interior segue a variação da concentração de poluentes exteriores. Foram selecionadas quatro semanas representativas: a semana 11 (inverno), a semana 19 (primavera), a semana 28 (pertencendo ao verão), e a semana 40 (representativa do outono).

4.2 Estratégias de ventilação natural

A presente secção pretende estudar e analisar o impacto da implementação de diferentes estratégias e mecanismos de ventilação natural referidos no decorrer dos capítulos anteriores. Foram executados cinco conjuntos de simulações com o objetivo de analisar os valores de Rph e concentração de poluentes no interior do edifício. Como base de comparação para os valores de Rph utilizou-se a norma EN 15251. A equação 4.1 permite o cálculo do caudal de ventilação baseado em duas componentes: ocupação e edifício.

$$q = n \times q_p + A \times q_B \quad (4.1)$$

Sendo n o número de ocupantes, q_p taxa de ventilação por ocupação (l/s, ocupante), A a área do pavimento e q_B taxa de ventilação atendendo às emissões do edifício (l/s, m²). Consideraram-se 50 ocupantes no interior do edifício, sendo a área total de aproximadamente 609 m².

Tabela 4.3 - Taxas de ventilação recomendadas segundo a EN 15251 para igrejas e galerias. (Adaptado de:[87])

| Categoria | Pessoas insatisfeitas [%] | Valores mínimos de Rph |
|---------------|---------------------------|------------------------|
| | | Período abertura |
| Categoria I | 15 | 1,40 |
| Categoria II | 20 | 0,98 |
| Categoria III | 30 | 0,66 |
| Categoria IV | >30 | <0,66 |

No que diz respeito à saúde dos ocupantes, as concentrações dos cinco poluentes analisados seguem a comparação com a Tabela 2.6 que traduz o “Índice de Qualidade do Ar” desenvolvido pela APA (Agência Portuguesa do Ambiente) [74]; é importante referir que o índice referido foi definido para a concentração exterior de poluentes. No ponto de vista da preservação de material histórico e/ou cultural presente no ambiente interior de um museu os valores limite seguem a Tabela 2.7 referente ao relatório *ASHRAE Handbook 2015* [74, 98]. Sempre que ultrapassada a sugestão de concentração limite o valor vermelho; quando este se situa abaixo é utilizada a cor verde.

4.2.1 Sim_2.1 – Sem tiragem térmica

A presente simulação pretende retratar uma situação em que não se tira partido da tiragem térmica. Para isto, introduziram-se as seguintes condições no programa: portas interiores abertas, todas as janelas superiores permanecem fechadas ao longo de todo o ano (Figura 4.10) e as janelas inferiores abrem apenas durante o período de abertura ao público do edifício (Figura 4.11). As condutas introduzidas na Sim1.2_Base foram removidas para que não exista qualquer mecanismo de tiragem térmica no edifício.

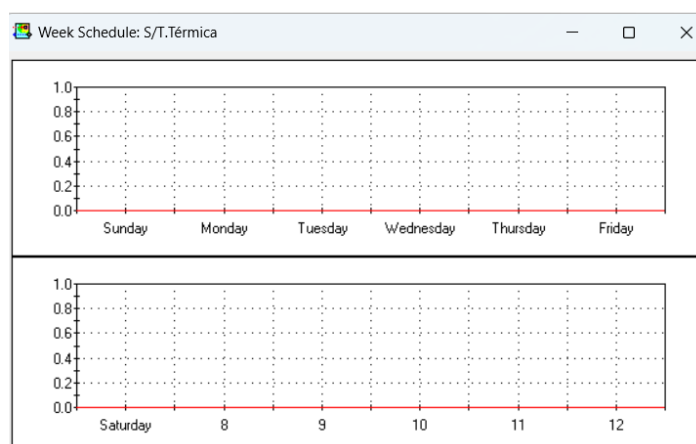


Figura 4.10 – Programação das janelas superiores

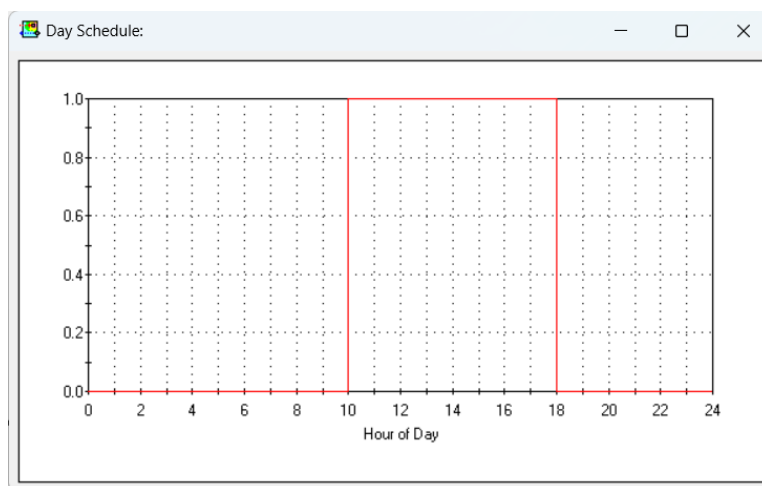


Figura 4.11 - Programação janelas inferiores coincidente com o período de funcionamento do museu

Os valores de Rph flutuam ao longo do ano atingindo os picos nos meses de julho e agosto devido à maior intensidade do vento nesta altura do ano, como referido anteriormente.

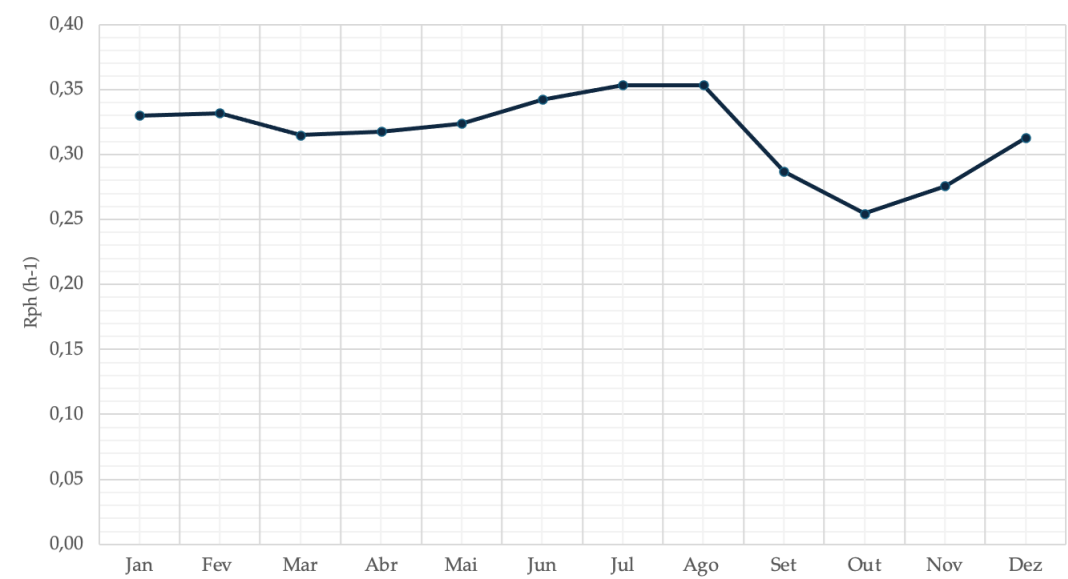


Figura 4.12 - Médias semanais de Rph ao longo do ano

Como é possível constatar pela Figura 4.12, o edifício apresenta médias mensais de Rph abaixo dos valores mínimos impostos pela norma EN 15251 (Tabela 4.3). Para além desta análise em termos de média mensal é importante analisar os valores de Rph horários ao longo de um ano, consultar Figura 4.13.

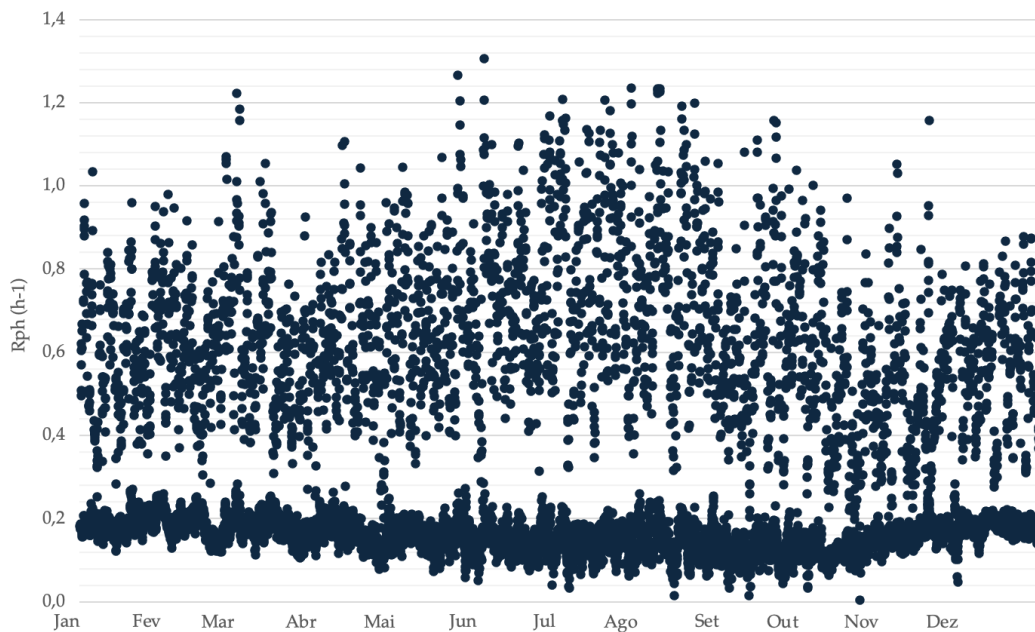


Figura 4.13 - Rph horário ao longo de um ano

A Tabela 4.4 traduz a comparação entre valores prescritos na norma EN 15251 e os valores obtidos na simulação executada (Figura 4.13). É possível concluir que os valores de Rph estão maioritariamente inseridos nas categorias III e IV.

Tabela 4.4 - Percentagem de valores de Rph para cada categoria da norma EN 15251 [%]

| Categoria I | Categoria II | Categoria III | Categoria IV |
|-------------|--------------|---------------|--------------|
| 0,0 | 6,2 | 38,9 | 54,5 |

Na Figura 4.14, é possível analisar a concentração de poluentes no interior do edifício recorrendo a uma estratégia de ventilação natural sem tiragem térmica. Analisando a Tabela 4.5 é possível constatar a variação, em percentagem, das concentrações interiores do aglomerado de poluentes. A semana 11 (inverno) apresenta a maior descida, 11,5%, o que pode ser explicado pelas condições mais favoráveis de ventilação nesta altura do ano. Por outro lado, a semana 40 (outono) apresenta a menor redução, o motivo pode estar associado a fracas condições de tiragem térmica no outono, como visto anteriormente, o que proporciona uma fraca variação dos valores obtidos.

Tabela 4.5 - Comparação Sim1.3_Base e Sim_2.1 relativamente a concentração de poluentes $\mu\text{g}/\text{m}^3$

| | Semana 11 | Semana 19 | Semana 28 | Semana 40 |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Sim1.3_Base | 153,2 | 133,0 | 150,4 | 138,6 |
| Sim_2.1 | 135,5 | 129,7 | 138,0 | 137,8 |
| Redução (%) | -11,50% | -2,50% | -8,20% | -0,60% |

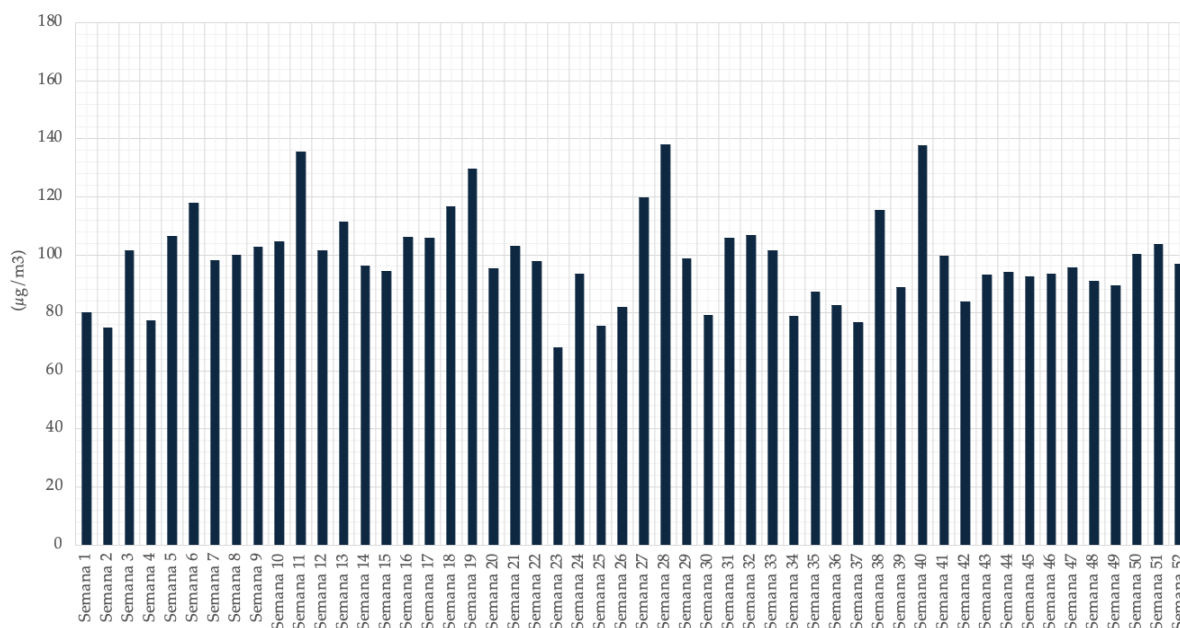


Figura 4.14 - Média semanal da concentração de poluentes no interior do edifício ao longo de um ano

A Tabela 4.6 pretende exibir os valores das concentrações de cada espécie de poluentes no interior do edifício. Os valores apresentados correspondem a médias semanais representativas de cada estação do ano, tendo sido selecionadas as semanas mais gravosas numa avaliação de um ano completo, como referido anteriormente. Apresentam-se também as médias anuais bem como o conjunto agregado de todos os poluentes para que se tenha a perceção da concentração conjunta de poluentes no ambiente interior do edifício. A escala de cores que consta na Tabela 4.6 é referente ao “Índice da Qualidade do Ar” desenvolvido pela APA (consultar Tabela 2.6).

Tabela 4.6 - Concentração de poluentes interior vs Índice da Qualidade do ar $\mu\text{g}/\text{m}^3$

| | | Inverno | Primavera | Verão | Outono | Média Anual |
|--------|-----------------|---------|-----------|-------|--------|-------------|
| Sala 1 | NO2 | 41,5 | 38,7 | 43,9 | 51,7 | 34,90 |
| | PM2.5 | 3,9 | 5,5 | 7,3 | 3,4 | 4,32 |
| | PM10 | 12,6 | 12,3 | 15,3 | 13,1 | 12,38 |
| | SO2 | 1,0 | 0,6 | 0,3 | 0,4 | 0,61 |
| | O3 | 51,9 | 75,7 | 80,0 | 49,7 | 50,62 |
| | Agregado | 111,0 | 132,9 | 146,9 | 118,4 | 102,8 |
| Salão | NO2 | 37,4 | 38,7 | 43,2 | 49,8 | 33,39 |
| | PM2.5 | 4,6 | 6,2 | 8,1 | 3,9 | 4,32 |
| | PM10 | 14,5 | 13,6 | 17,1 | 14,8 | 14,22 |
| | SO2 | 0,7 | 0,6 | 0,3 | 0,5 | 0,57 |
| | O3 | 49,2 | 73,3 | 83,6 | 51,0 | 50,62 |
| | Agregado | 106,4 | 132,4 | 152,3 | 119,9 | 103,1 |
| Sala D | NO2 | 31,0 | 38,7 | 58,2 | 49,8 | 40,95 |
| | PM2.5 | 3,9 | 5,7 | 8,1 | 3,5 | 4,54 |
| | PM10 | 12,5 | 12,7 | 16,3 | 13,5 | 12,94 |
| | SO2 | 0,6 | 0,9 | 0,3 | 0,6 | 0,68 |
| | O3 | 41,0 | 80,6 | 110,7 | 70,9 | 61,78 |
| | Agregado | 89,0 | 138,6 | 193,7 | 138,3 | 120,9 |

Analisando a Tabela 4.6 é expectável assumir que a QAI está maioritariamente inserida na categoria “Muito bom”. Selecionando o compartimento que evidencia a maior concentração no agregado de poluentes e, realizando uma análise diária ao longo da semana representativa do verão (Figura 4.14) é possível visualizar valores largamente prejudiciais para a saúde dos ocupantes.

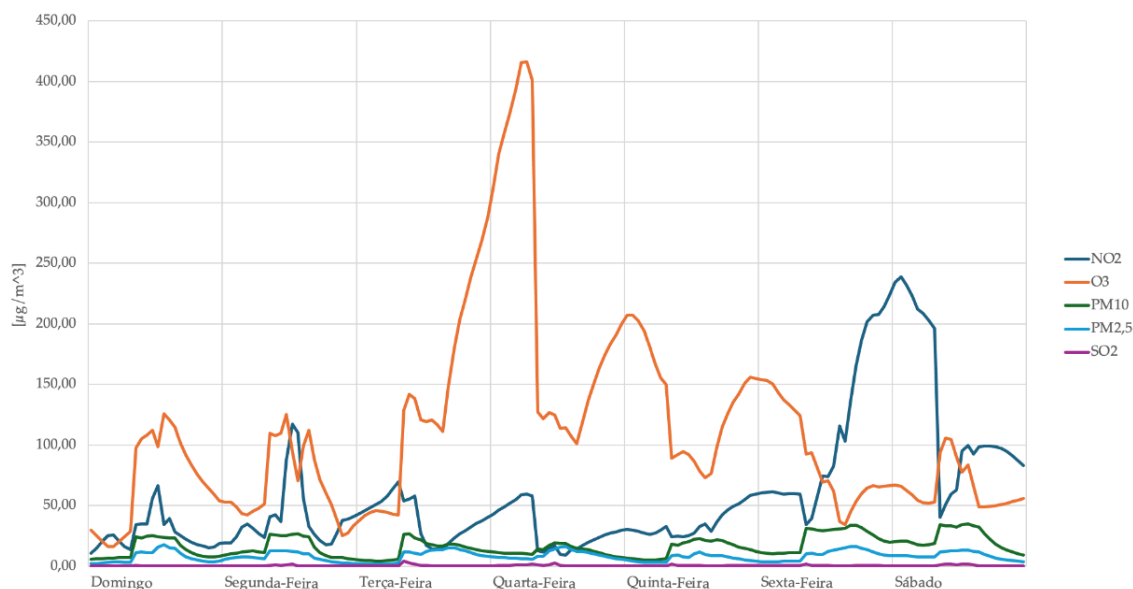


Figura 4.15 - Concentração de poluentes no interior da Sala D na semana representativa de verão

A Figura 4.15 pretende exibir a variação da concentração de cada poluente no ambiente interior da sala D durante a semana 28 (verão). É escolhida a semana em questão por apresentar os valores mais elevados de concentração de poluentes como pode ser constatado pela Tabela 4.7. No que diz respeito à preservação de artefactos no interior de um museu as concentrações registadas para os poluentes NO_2 , PM_{10} e O_3 ultrapassam as sugestões limite impostas no *HandBook ASHRAE 2015*.

Tabela 4.7 - Concentração de poluentes interior vs Sugestão limite ASHRAE 2015 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| | | Inverno | Primavera | Verão | Outono | Média Anual |
|--------|-----------------|---------|-----------|-------|--------|-------------|
| Sala 1 | NO2 | 41,5 | 38,7 | 43,9 | 51,7 | 34,90 |
| | PM2.5 | 3,9 | 5,5 | 7,3 | 3,4 | 4,32 |
| | PM10 | 12,6 | 12,3 | 15,3 | 13,1 | 12,38 |
| | SO2 | 1,0 | 0,6 | 0,3 | 0,4 | 0,61 |
| | O3 | 51,9 | 75,7 | 80,0 | 49,7 | 50,62 |
| | Agregado | 111,0 | 132,9 | 146,9 | 118,4 | 102,8 |
| Salão | NO2 | 37,4 | 38,7 | 43,2 | 49,8 | 33,39 |
| | PM2.5 | 4,6 | 6,2 | 8,1 | 3,9 | 4,32 |
| | PM10 | 14,5 | 13,6 | 17,1 | 14,8 | 14,22 |
| | SO2 | 0,7 | 0,6 | 0,3 | 0,5 | 0,57 |
| | O3 | 49,2 | 73,3 | 83,6 | 51,0 | 50,62 |
| | Agregado | 106,4 | 132,4 | 152,3 | 119,9 | 103,1 |
| Sala D | NO2 | 31,0 | 38,7 | 58,2 | 49,8 | 40,95 |
| | PM2.5 | 3,9 | 5,7 | 8,1 | 3,5 | 4,54 |
| | PM10 | 12,5 | 12,7 | 16,3 | 13,5 | 12,94 |
| | SO2 | 0,6 | 0,9 | 0,3 | 0,6 | 0,68 |
| | O3 | 41,0 | 80,6 | 110,7 | 70,9 | 61,78 |
| | Agregado | 89,0 | 138,6 | 193,7 | 138,3 | 120,9 |

4.2.2 Sim_2.2 – Ventilação Unilateral

Como visto anteriormente, a estratégia de ventilação unilateral pode ser obtida através da utilização de apenas uma abertura em que as trocas entre o ambiente interior e exterior são executadas pela mesma abertura. Por outro lado, podem ser utilizadas duas aberturas para que seja possível efetuar a circulação de massas de ar nos dois sentidos em simultâneo, do exterior para o interior e do interior para o exterior. As simulações reportadas de seguida pretendem retratar as duas estratégias distintas.

4.2.2.1 Sim_2.2.1 – 1 Abertura

Para que se consiga reproduzir da melhor forma possível a estratégia de ventilação unilateral com recurso a apenas uma abertura, foram estabelecidas as seguintes condições: as portas interiores foram fechadas e estabeleceu-se uma programação de abertura da janela inferior coincidente com o horário de abertura do edifício. Todas as janelas superiores foram fechadas durante todos os períodos da simulação em causa.

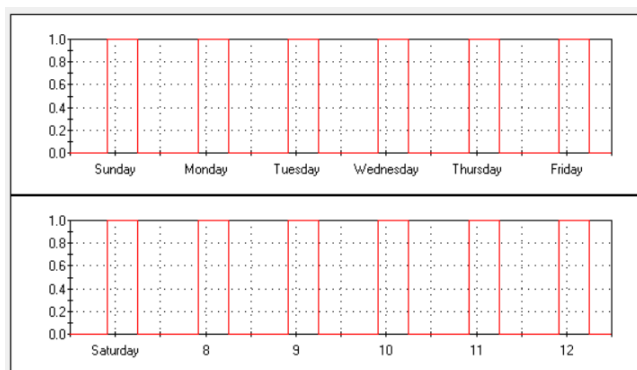


Figura 4.16 - Programação janelas inferiores

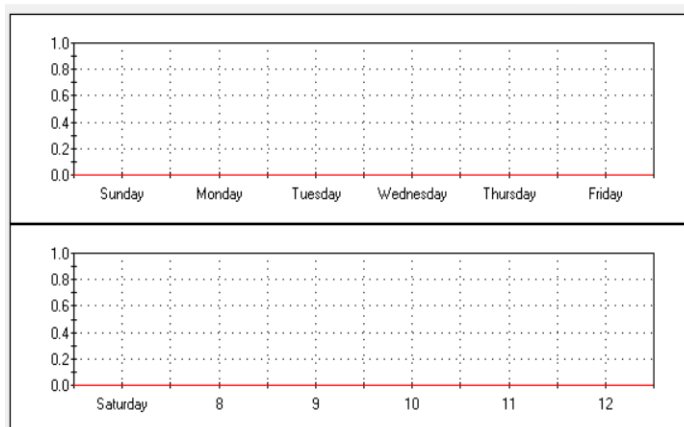


Figura 4.17 - Programação janelas superiores

Como seria expectável, a linha de tendência dos valores de Rph da presente simulação é semelhante à linha observada na simulação anterior (Sim_2.1 – Sem tiragem térmica). Esta semelhança pode ser explicada pelas condições impostas nas duas simulações serem bastante semelhantes. A única diferença significativa entre elas é o facto de, na presente simulação, as portas interiores estarem fechadas. Esta análise pode ser realizada com recurso à Figura 4.18.

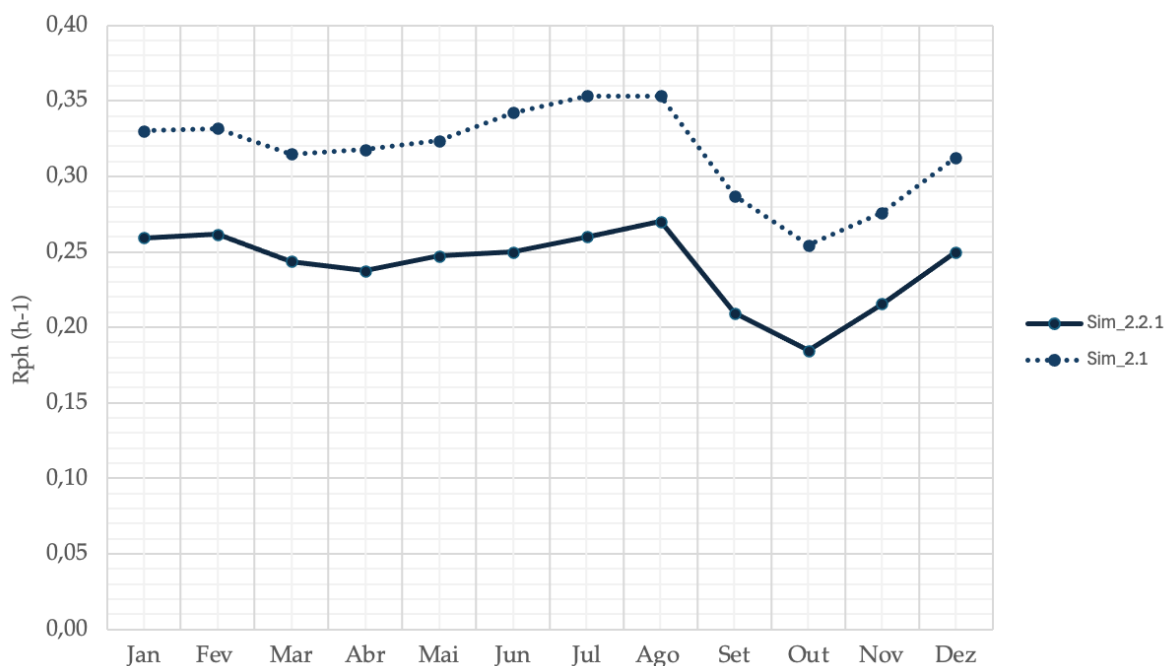


Figura 4.18 - Média mensal de Rph ao longo de um ano

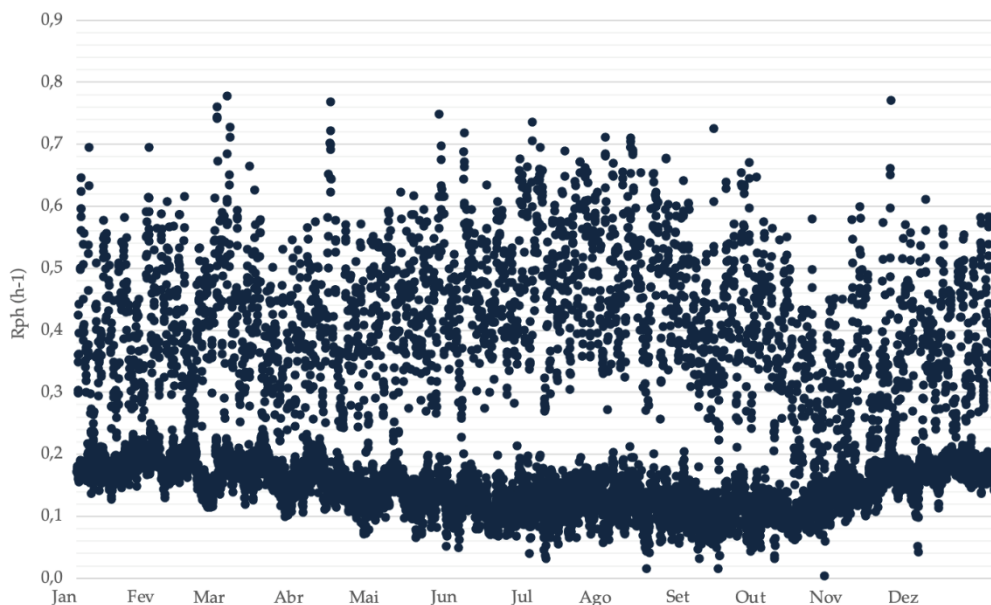


Figura 4.19 - Valores de Rph horários ao longo de um ano

Pela Tabela 4.8, é possível constatar que a maioria dos valores estão inseridos na Categoria IV (97,9%) da norma EN 15251. Tratando-se, no presente caso de estudo, de um edifício aberto ao público este cenário é pouco provável pois as portas interiores estão maioritariamente do tempo abertas para circulação dos visitantes.

Tabela 4.8 - Percentagem de valores de Rph para cada categoria da norma EN 15251

| Categoria I | Categoria II | Categoria III | Categoria IV |
|-------------|--------------|---------------|--------------|
| 0,0 | 0,0 | 2,1 | 97,9 |

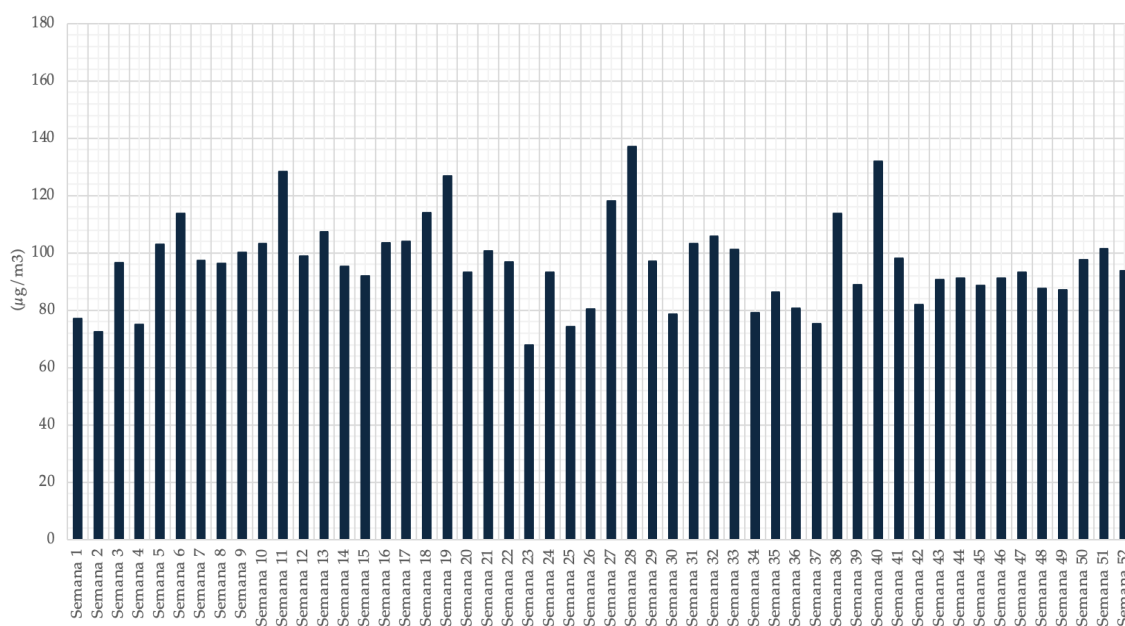


Figura 4.20 - Média semanal da concentração de poluentes no interior do edifício ao longo de um ano

O gráfico apresentado na Figura 4.20 permite concluir, mais uma vez, que as semanas de maior concentração do agregado de poluentes no interior do edifício são: semana 11 (inverno), semana 19 (primavera), semana 28 (verão) e semana 40 (outono). Assim sendo selecionam-se as semanas em questão como representativas para a análise e comparação com os valores limite em estudo.

A Tabela 4.9 permite concluir que aplicando a presente estratégia de ventilação natural existe uma redução na concentração de poluentes de forma generalizada. Nenhuma semana apresenta um “Índice de Qualidade do Ar” inferior a “Bom”.

Tabela 4.9 - Concentração de poluentes no ambiente interior vs Índice da Qualidade do Ar $\mu\text{g}/\text{m}^3$

| | | Inverno | Primavera | Verão | Outono | Média Anual |
|--------|-----------------|---------|-----------|-------|--------|-------------|
| Sala 1 | NO2 | 33,0 | 39,9 | 45,0 | 46,3 | 31,9 |
| | PM2.5 | 2,5 | 3,1 | 4,0 | 1,6 | 2,5 |
| | PM10 | 7,9 | 6,8 | 8,5 | 6,2 | 7,1 |
| | SO2 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,5 |
| | O3 | 51,3 | 70,4 | 83,2 | 51,4 | 52,2 |
| | Agregado | 95,2 | 120,6 | 141,1 | 105,9 | 94,2 |
| Salão | NO2 | 37,0 | 38,6 | 43,5 | 49,5 | 33,0 |
| | PM2.5 | 4,5 | 6,2 | 8,1 | 3,9 | 5,0 |
| | PM10 | 14,3 | 13,7 | 17,1 | 14,9 | 14,3 |
| | SO2 | 0,7 | 0,6 | 0,3 | 0,5 | 0,6 |
| | O3 | 49,6 | 72,4 | 81,7 | 50,4 | 50,6 |
| | Agregado | 106,2 | 131,4 | 150,7 | 119,2 | 103,5 |
| Sala D | NO2 | 32,0 | 39,1 | 43,3 | 49,9 | 31,7 |
| | PM2.5 | 2,1 | 2,3 | 2,8 | 0,9 | 1,7 |
| | PM10 | 6,5 | 5,1 | 5,8 | 3,5 | 4,6 |
| | SO2 | 0,6 | 0,6 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| | O3 | 50,6 | 71,0 | 79,8 | 48,3 | 51,1 |
| | Agregado | 91,8 | 118,0 | 132,0 | 103,0 | 89,6 |

Selecionando o compartimento que apresenta o agregado de poluentes mais gravoso e realizando uma análise diária da concentração de cada poluente é possível estabelecer o gráfico apresentado na Figura 4.21. É com facilidade que se conclui que o NO₂ e o O₃ são os poluentes que mais afetam o ambiente interior. Estudos em centros urbanos, desenvolvidos e publicados anteriormente, evidenciam a mesma conclusão. O estudo realizado por P. Sicard et al. teve como objeto estudar as tendências da poluição do ar urbano numa perspectiva global concluindo que a exposição global da população urbana ao O₃ aumentou 89% e que as concentrações médias anuais de NO₂ aumentaram em 71% últimas duas décadas [106]. É ainda

importante ressaltar que a presente estratégia de ventilação natural resultou numa redução da concentração de poluentes no ambiente interior, como já constatado pela Tabela 4.9.

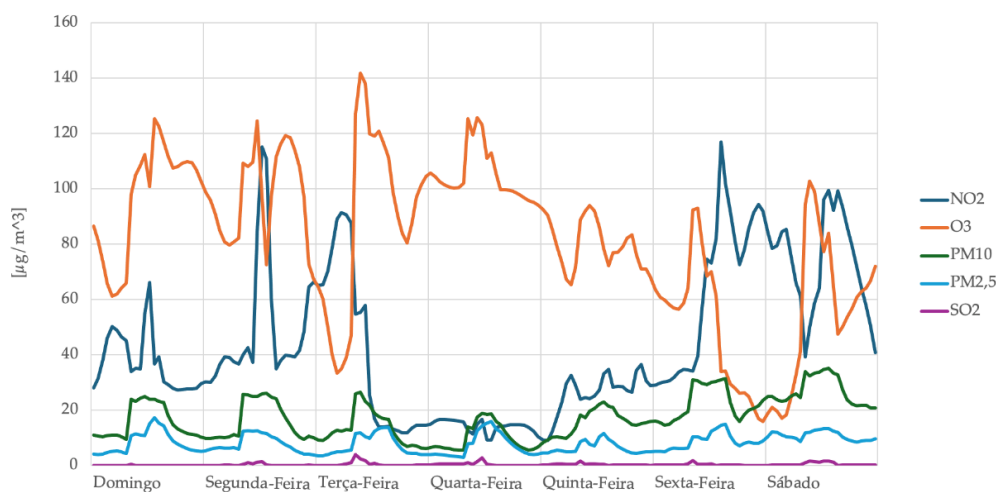


Figura 4.21 - Concentração de poluentes no interior do Salão na semana representativa de verão

A Tabela 4.10 reforça as conclusões anteriores de que os poluentes O₃ e NO₂ são os que mais impactam a QAI, ultrapassando os limites propostos para uma preservação adequada de material histórico e/ou cultural. É importante referir que, no compartimento “Salão”, o material particulado PM₁₀ apresenta concentrações prejudiciais para a preservação de artefactos, o que ilustra a importância da localização de cada compartimento.

Tabela 4.10 - Concentração de poluentes interior vs sugestão de valores limite ASHRAE 2015 (µg/m³)

| | | Inverno | Primavera | Verão | Outono | Média Anual |
|--------|-----------------|---------|-----------|-------|--------|-------------|
| Sala 1 | NO2 | 33,0 | 39,9 | 45,0 | 46,3 | 31,9 |
| | PM2.5 | 2,5 | 3,1 | 4,0 | 1,6 | 2,5 |
| | PM10 | 7,9 | 6,8 | 8,5 | 6,2 | 7,1 |
| | SO2 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,5 |
| | O3 | 51,3 | 70,4 | 83,2 | 51,4 | 52,2 |
| | Agregado | 95,2 | 120,6 | 141,1 | 105,9 | 94,2 |
| Salão | NO2 | 37,0 | 38,6 | 43,5 | 49,5 | 33,0 |
| | PM2.5 | 4,5 | 6,2 | 8,1 | 3,9 | 5,0 |
| | PM10 | 14,3 | 13,7 | 17,1 | 14,9 | 14,3 |
| | SO2 | 0,7 | 0,6 | 0,3 | 0,5 | 0,6 |
| | O3 | 49,6 | 72,4 | 81,7 | 50,4 | 50,6 |
| | Agregado | 106,2 | 131,4 | 150,7 | 119,2 | 103,5 |
| Sala D | NO2 | 32,0 | 39,1 | 43,3 | 49,9 | 31,7 |
| | PM2.5 | 2,1 | 2,3 | 2,8 | 0,9 | 1,7 |
| | PM10 | 6,5 | 5,1 | 5,8 | 3,5 | 4,6 |
| | SO2 | 0,6 | 0,6 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| | O3 | 50,6 | 71,0 | 79,8 | 48,3 | 51,1 |
| | Agregado | 91,8 | 118,0 | 132,0 | 103,0 | 89,6 |

4.2.2.2 Sim_2.2.2 – 2 Aberturas

Adicionada a abertura da janela superior é obtida a segunda estratégia de ventilação unilateral explicada anteriormente. É executada a programação da janela superior por forma

a coincidir com a janela inferior e, em simultâneo, com o horário de abertura do museu. A Figura 4.22 permite a visualização dos valores médios de Rph ao longo do ano. Observa-se a preponderância dos valores obtidos durante os meses de janeiro, fevereiro e dezembro. Este fenómeno pode ser atribuído à implementação do mecanismo de tiragem térmica, pois, durante estes meses, o gradiente de temperatura entre os ambientes interior e exterior é superior. Em contraste, os valores de Rph registados no mês de outubro são notavelmente os mais baixos, o que se deve ao gradiente térmico reduzido e baixa velocidade do vento, característica de Lisboa nesta época do ano.

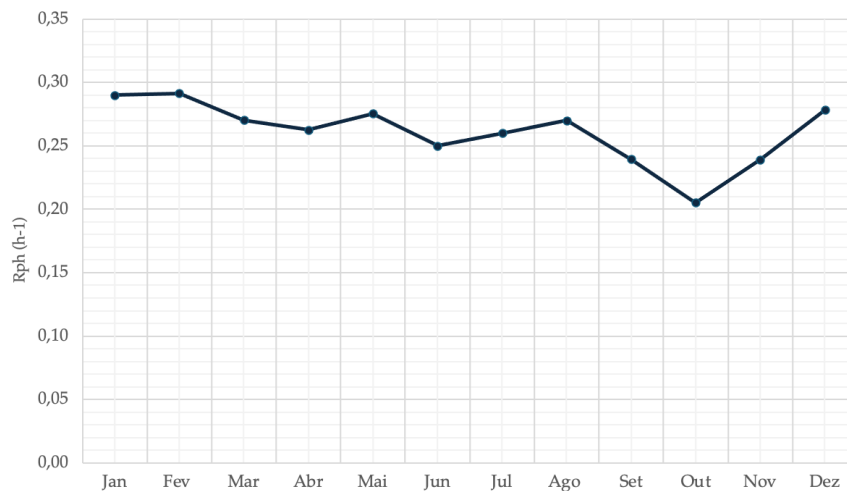


Figura 4.22 - Valores médios mensais de Rph ao longo de um ano

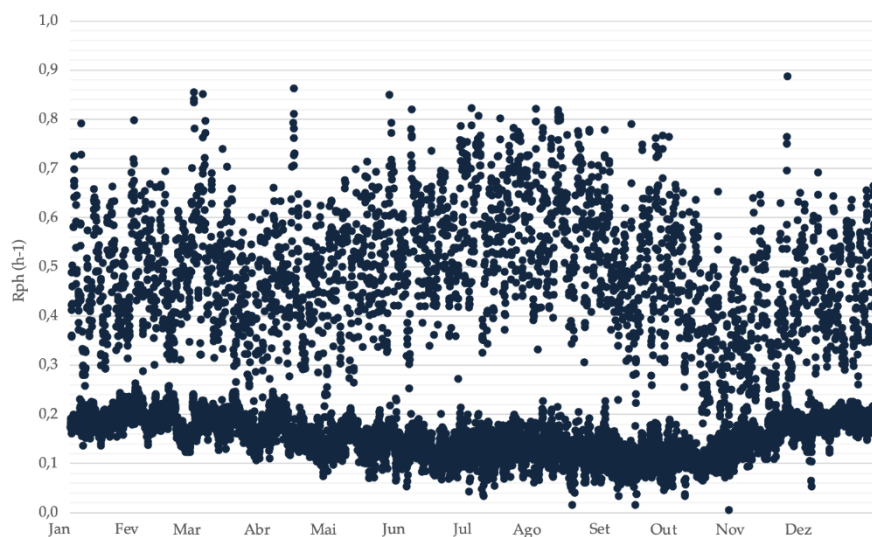


Figura 4.23 - Valores de Rph horários ao longo de um ano

Esta análise sublinha a importância dos fatores climáticos sazonais na variação dos valores de Rph, enfatizando as condições meteorológicas, incluindo a diferença de temperatura e velocidade do vento. Como referido anteriormente, o conhecimento destes fatores é crucial para otimizar os sistemas de ventilação de qualquer edifício pela sua influência direta na eficiência nos mecanismos e estratégias de ventilação natural.

Analisando a Tabela 4.11, é perceptível o acréscimo significativo da percentagem de valores de Rph na categoria III da norma EN 15251 quando adotada a estratégia de ventilação unilateral com recurso aos dois vãos envidraçados disponíveis em cada compartimento do edifício; ainda assim a maioria dos valores encontra-se na categoria IV indicando valores pouco recomendados para os utilizadores.

Tabela 4.11 - Percentagem de valores de Rph para cada categoria da norma EN 15251

| Categoria I | Categoria II | Categoria III | Categoria IV |
|-------------|--------------|---------------|--------------|
| 0,0 | 0,0 | 11,6 | 88,4 |

A Figura 4.24 evidencia que as duas semanas mais prejudiciais para a QAI são a 28 (verão) e 40 (outono). O verão, além de ser uma estação em que as condições para que exista ventilação natural são desfavoráveis, apresenta elevadas concentrações de poluentes exteriores, como visto anteriormente [107, 108, 109]. Esta observação sublinha a importância da adaptação das estratégias de ventilação às condições anuais por modo a mitigar a concentração de poluentes no interior dos edifícios. A análise dos dados apresentados na Figura 4.24 demonstra a necessidade de um planeamento cuidadoso das estratégias de ventilação para garantir a uma qualidade do ar interior adequada ao longo de todo o ano, especialmente em climas com variações sazonais pronunciadas. A implementação de mecanismos de ventilação que possam ser adaptáveis pode contribuir de forma vastamente positiva no sentido de equilibrar as concentrações de poluentes, proporcionando um ambiente interior saudável.

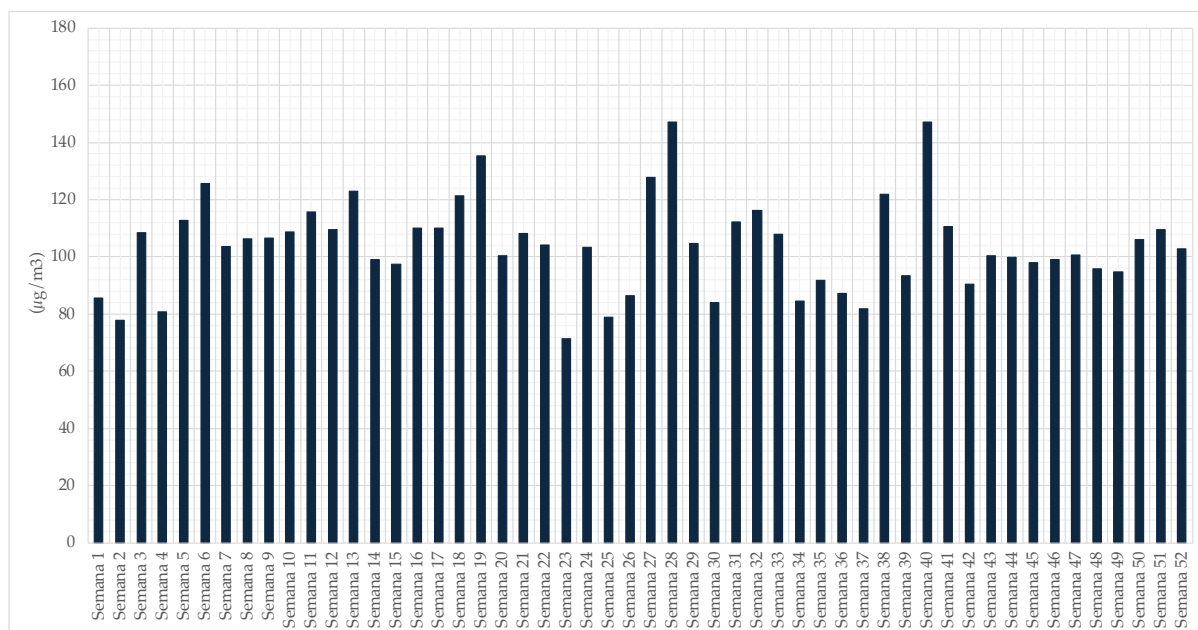


Figura 4.24 - Média semanal da concentração de poluentes no interior do edifício ao longo de um ano

A Tabela 4.12 traduz a introdução da estratégia de ventilação unilateral com recurso a duas aberturas (janela superior e inferior). Consta-se que a média anual do conjunto de poluentes em cada compartimento é superior ao exibido na simulação anterior (Sim 2.2.1 – 1 Abertura).

Tabela 4.12 - Concentração de poluentes no ambiente interior vs Índice da Qualidade do Ar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| | | Inverno | Primavera | Verão | Outono | Média Anual |
|--------|-----------------|---------|-----------|-------|--------|-------------|
| Sala 1 | NO2 | 29,6 | 39,0 | 45,4 | 52,3 | 34,6 |
| | PM2.5 | 7,2 | 5,0 | 6,6 | 3,0 | 3,9 |
| | PM10 | 19,7 | 18,5 | 23,5 | 20,4 | 19,5 |
| | SO2 | 0,6 | 0,6 | 0,3 | 0,5 | 0,6 |
| | O3 | 55,9 | 76,9 | 86,1 | 53,9 | 52,7 |
| | Agregado | 112,9 | 140,0 | 161,9 | 130,1 | 111,3 |
| Salão | NO2 | 30,3 | 38,5 | 43,5 | 49,8 | 33,1 |
| | PM2.5 | 9,2 | 6,2 | 8,1 | 3,9 | 5,0 |
| | PM10 | 18,6 | 18,1 | 23,3 | 20,3 | 19,5 |
| | SO2 | 0,6 | 0,6 | 0,3 | 0,5 | 0,6 |
| | O3 | 54,3 | 72,4 | 81,6 | 50,4 | 50,6 |
| | Agregado | 113,0 | 135,7 | 156,8 | 124,9 | 108,7 |
| Sala D | NO2 | 29,2 | 39,2 | 43,4 | 50,8 | 31,8 |
| | PM2.5 | 3,7 | 2,3 | 2,8 | 0,9 | 1,7 |
| | PM10 | 19,3 | 18,2 | 22,3 | 17,9 | 19,0 |
| | SO2 | 0,5 | 0,6 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| | O3 | 56,4 | 71,1 | 79,8 | 48,0 | 51,1 |
| | Agregado | 109,2 | 131,4 | 148,7 | 118,0 | 104,1 |

Neste caso, o compartimento Sala 1, na semana 28 (verão) apresenta o valor mais elevado de concentração de poluentes, alcançando o nível “Bom” para o material particulado PM_{10} , dióxido de azoto (NO_2) e ozono (O_3) comparativamente com as categorias do “Índice de Qualidade do Ar”.

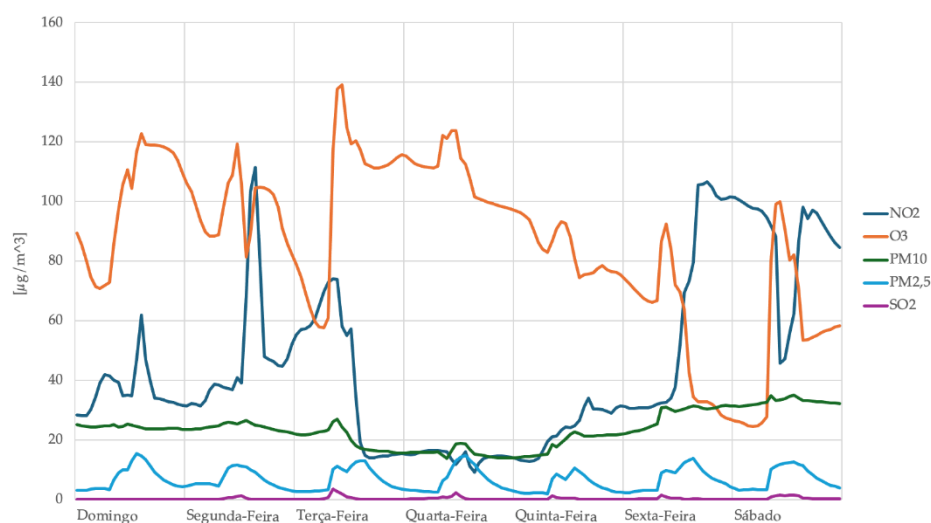


Figura 4.25 - Concentração de poluentes no interior da Sala 1 ao longo da semana representativa de verão

Analisando a semana 28 (verão) ao detalhe através da Figura 4.25, é perceptível que os valores de ozono e dióxido de azoto voltam a ser os mais preocupantes. Destaca-se a existência de uma tendência constante de partículas PM₁₀ no interior da Sala 1, comparativamente com a estratégia de ventilação unilateral – 1 janela em que ocorria uma variação ao longo do dia (ver Figura 4.21).

Tabela 4.13 - Concentração de poluentes no ambiente interior vs ASHRAE 2015 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| | | Inverno | Primavera | Verão | Outono | Média Anual |
|--------|-----------------|---------|-----------|-------|--------|-------------|
| Sala 1 | NO2 | 29,6 | 39,0 | 45,4 | 52,3 | 34,6 |
| | PM2.5 | 7,2 | 5,0 | 6,6 | 3,0 | 3,9 |
| | PM10 | 19,7 | 18,5 | 23,5 | 20,4 | 19,5 |
| | SO2 | 0,6 | 0,6 | 0,3 | 0,5 | 0,6 |
| | O3 | 55,9 | 76,9 | 86,1 | 53,9 | 52,7 |
| | Agregado | 112,9 | 140,0 | 161,9 | 130,1 | 111,3 |
| Salão | NO2 | 30,3 | 38,5 | 43,5 | 49,8 | 33,1 |
| | PM2.5 | 9,2 | 6,2 | 8,1 | 3,9 | 5,0 |
| | PM10 | 18,6 | 18,1 | 23,3 | 20,3 | 19,5 |
| | SO2 | 0,6 | 0,6 | 0,3 | 0,5 | 0,6 |
| | O3 | 54,3 | 72,4 | 81,6 | 50,4 | 50,6 |
| | Agregado | 113,0 | 135,7 | 156,8 | 124,9 | 108,7 |
| Sala D | NO2 | 29,2 | 39,2 | 43,4 | 50,8 | 31,8 |
| | PM2.5 | 3,7 | 2,3 | 2,8 | 0,9 | 1,7 |
| | PM10 | 19,3 | 18,2 | 22,3 | 17,9 | 19,0 |
| | SO2 | 0,5 | 0,6 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| | O3 | 56,4 | 71,1 | 79,8 | 48,0 | 51,1 |

As Tabelas 4.10 e 4.13 apresentam dados que demonstram a complexidade da relação entre as taxas de renovação de ar e a qualidade do ar interior. Kukadia e Palmer realizaram um estudo piloto em que foram comparados dois edifícios adjacentes, recorrendo a estratégias de ventilação natural e a outra ventilação mecânica. Os níveis de concentração de poluentes no ambiente interior foram monitorizados concluindo que, geralmente, os níveis de poluentes eram mais elevados no edifício que recorria a uma estratégia de ventilação natural (qualquer que fosse) comparativamente com o edifício que seguia uma estratégia de ventilação mecânica [110]. Embora seja intuitivo assumir que uma maior renovação de ar resulta no aumento da QAI, em meio urbano, essa conclusão não é sempre linear.

4.2.3 Sim_2.3 – Ventilação Cruzada

O conjunto de simulações apresentado de seguida tem como objetivo estudar o impacto de uma estratégia de ventilação cruzada. Na Sim_2.3.1 as janelas e portas posicionadas nas fachadas a noroeste e sudeste estão abertas, seguindo o horário de abertura do edifício, tirando partido do vento predominante. A Sim_2.3.2 tem como objetivo perceber o impacto de uma

estratégia de ventilação cruzada sem utilizar o efeito do vento predominante. Neste caso, as janelas e portas abertas no decorrer do período de abertura do edifício estão posicionadas nas fachadas a sudoeste e nordeste. É expectável que o vento tenha um impacto inferior nesta condição sobressaindo o efeito de tiragem térmica.

4.2.3.1 Sim_2.3.1 – Norte / Sul

A Figura 4.26 pretende identificar os vãos envidraçados que foram abertos por forma a proporcionar a estratégia de ventilação cruzada ao edifício.

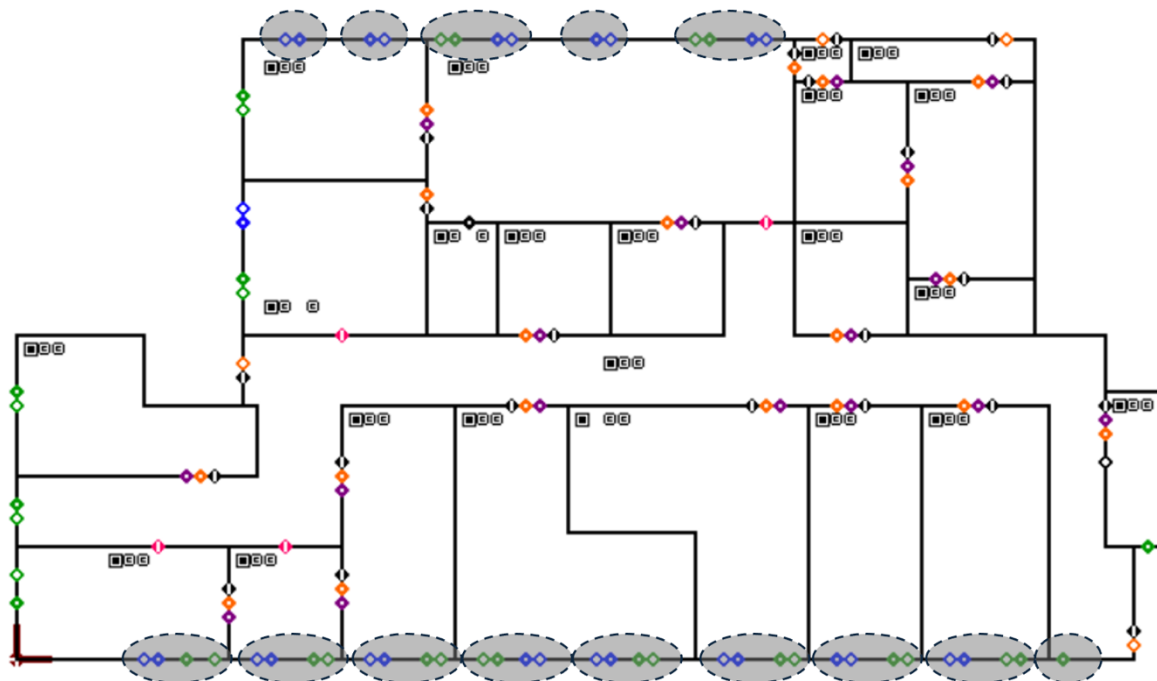


Figura 4.26 - Identificação dos vãos envidraçados em funcionamento

Ao analisar a Figura 4.26, fica evidente que a estratégia de ventilação adotada está configurada para tirar proveito da direção predominante do vento. Esta configuração é crucial para analisar o impacto do vento na entrada de poluentes no interior do edifício e na sua saída. Note-se que todos os restantes vãos envidraçados se encontram fechados no decorrer de toda a simulação. A Figura 4.27 exhibe as médias mensais dos valores de Rph, sendo que os valores mais elevados ocorrem nos meses de verão (julho e agosto). Como visto anteriormente, nesta altura do ano, o vento em Lisboa atinge o seu pico.

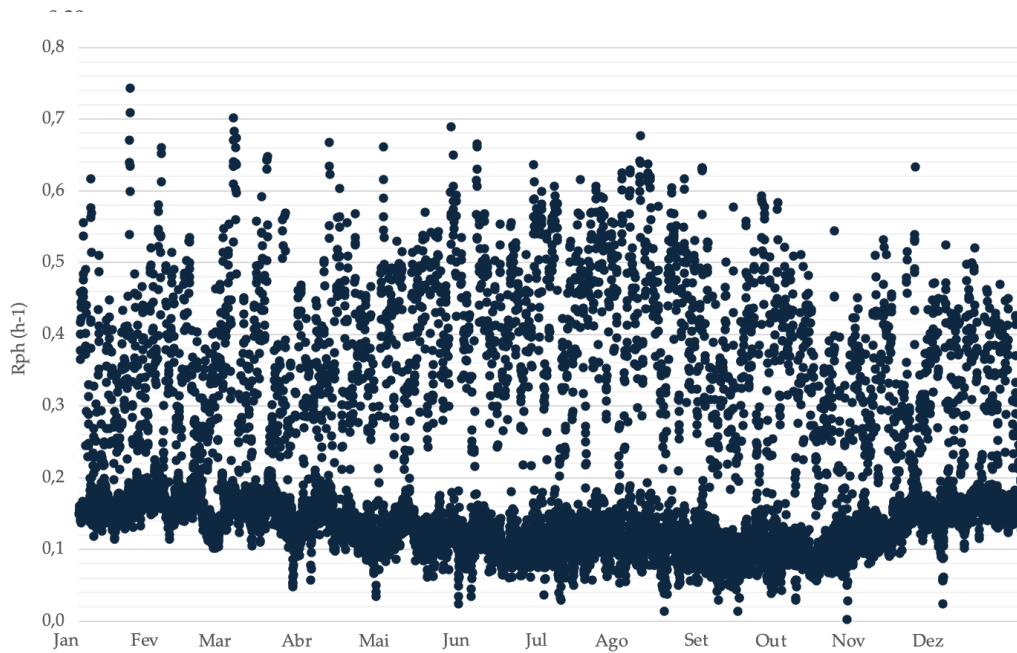


Figura 4.28 - Valores de Rph horários ao longo de um ano

A análise da Tabela 4.14 revela que a ventilação cruzada atinge uma percentagem significativamente superior de valores de Rph na categoria IV da norma EN 15251. Os valores baixos de renovações horárias podem ser explicados pelo menor número de vãos envidraçados em funcionamento. Esta conclusão sublinha a importância do estudo e análise das estratégias de ventilação natural passíveis de adotar em cada edifício, particularmente em locais onde a qualidade do ar interior seja uma preocupação crítica.

Tabela 4.14 - Percentagem de valores de Rph para cada categoria da norma EN 15251

| Categoria I | Categoria II | Categoria III | Categoria IV |
|-------------|--------------|---------------|--------------|
| 0,0 | 0,0 | 0,6 | 99,4 |

A Figura 4.29 identifica a semana 40, no outono, como a mais crítica em termos de concentração de poluentes no interior do edifício. É possível observar, na Figura 4.29, variações nos picos mais críticos em comparação com a Figura 4.24 (Sim_2.2.2).

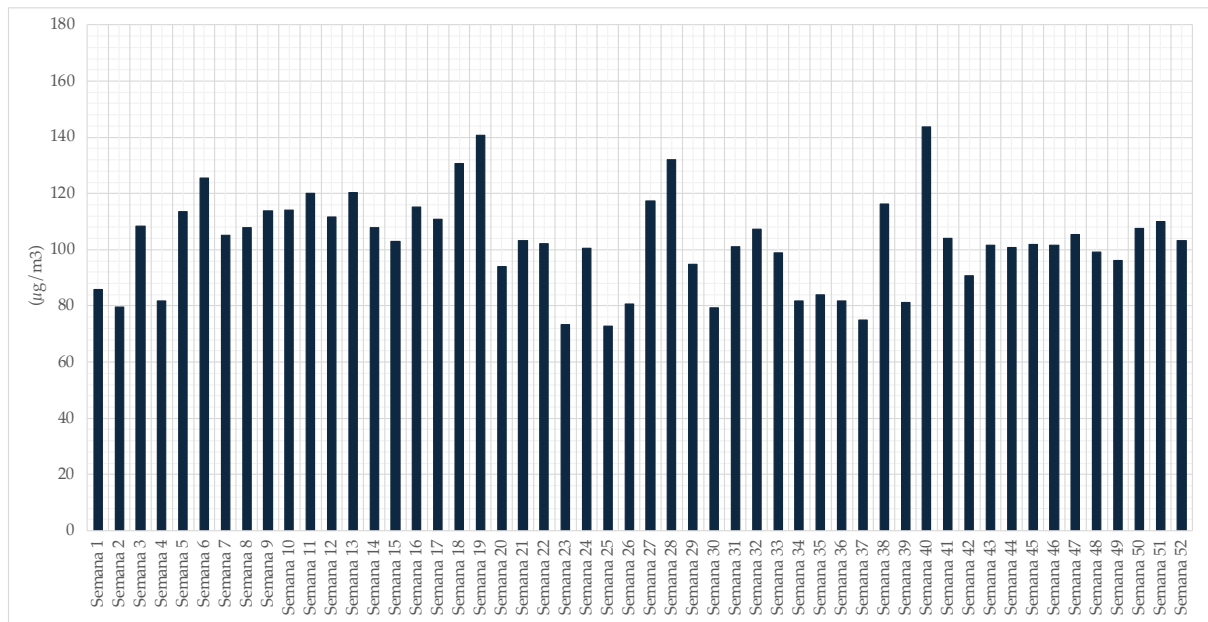


Figura 4.29 - Médias semanais da concentração de poluentes no interior do edifício ao longo de um ano

A Tabela 4.15 indica uma melhoria na qualidade do ar interior nas semanas 28 (verão) e 40 (outono) e um agravamento nas semanas 11 (inverno) e 19 (primavera) comparativamente com a estratégia anterior (Sim_2.2.2 – 2Aberturas).

Tabela 4.15 - Comparação Sim_2.2.2 e Sim_2.3.1 relativamente à concentração de poluentes ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| | Semana 11 | Semana 19 | Semana 28 | Semana 40 |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Sim_2.2.2 | 115,7 | 135,3 | 147,1 | 147,1 |
| Sim_2.3.1 | 120,0 | 140,7 | 132,0 | 143,6 |
| Varição (%) | 3,7 | 4,0 | -10,3 | -2,4 |

A análise detalhada fornecida pela Tabela 4.16 permite identificar as concentrações específicas de diferentes poluentes nos compartimentos mais críticos do edifício. A Tabela destaca que, na sala D, durante o outono, os níveis de poluição são particularmente elevados. Entre os poluentes monitorizados, o NO_2 e o O_3 são os principais responsáveis pela elevada deterioração da QAI.

Os resultados indicam que, no outono, a combinação de fatores como ventilação mais reduzida e condições climáticas adversas favorece a acumulação de poluentes na sala D. O NO_2 , frequentemente proveniente de fontes de combustão, e o O_3 , formado por reações fotoquímicas, atingem níveis que exigem atenção especial por forma a mitigar os riscos para a saúde dos ocupantes.

Tabela 4.16 - Concentração de poluentes no ambiente interior vs Índice da Qualidade do Ar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| | | Inverno | Primavera | Verão | Outono | Média Anual |
|--------|-----------------|---------|-----------|-------|--------|-------------|
| Sala 1 | NO2 | 38,6 | 39,1 | 44,1 | 53,9 | 34,8 |
| | PM2.5 | 3,8 | 5,4 | 7,0 | 3,3 | 4,1 |
| | PM10 | 12,2 | 12,0 | 14,4 | 12,5 | 11,8 |
| | SO2 | 0,9 | 0,6 | 0,3 | 0,5 | 0,6 |
| | O3 | 49,0 | 75,1 | 86,3 | 53,5 | 51,7 |
| | Agregado | 104,4 | 132,2 | 152,1 | 123,7 | 103,0 |
| Salão | NO2 | 28,9 | 35,4 | 44,3 | 48,3 | 28,3 |
| | PM2.5 | 3,8 | 5,8 | 8,2 | 3,8 | 4,5 |
| | PM10 | 12,1 | 12,9 | 17,2 | 14,5 | 12,8 |
| | SO2 | 0,6 | 0,5 | 0,3 | 0,5 | 0,5 |
| | O3 | 39,2 | 64,9 | 84,3 | 51,5 | 46,3 |
| | Agregado | 84,6 | 119,5 | 154,3 | 118,7 | 92,3 |
| Sala D | NO2 | 24,0 | 70,2 | 68,9 | 101,2 | 45,6 |
| | PM2.5 | 1,9 | 4,5 | 5,8 | 2,4 | 2,9 |
| | PM10 | 5,8 | 9,8 | 11,7 | 9,3 | 8,2 |
| | SO2 | 0,4 | 1,2 | 0,6 | 0,9 | 0,8 |
| | O3 | 35,1 | 119,3 | 133,2 | 108,5 | 82,9 |
| | Agregado | 67,2 | 205,0 | 220,2 | 222,4 | 140,4 |

A Figura 4.30 apresenta dados críticos acerca das concentrações de poluentes no interior da sala D ao longo da semana 40 (outono). O destaque recai sobre o ozono (O_3) e o dióxido de azoto (NO_2) como principais poluentes no ambiente interior. As concentrações constatadas, significativamente acima dos níveis recomendados para padrões de QAI adequados, indicam um risco potencial à saúde dos ocupantes.

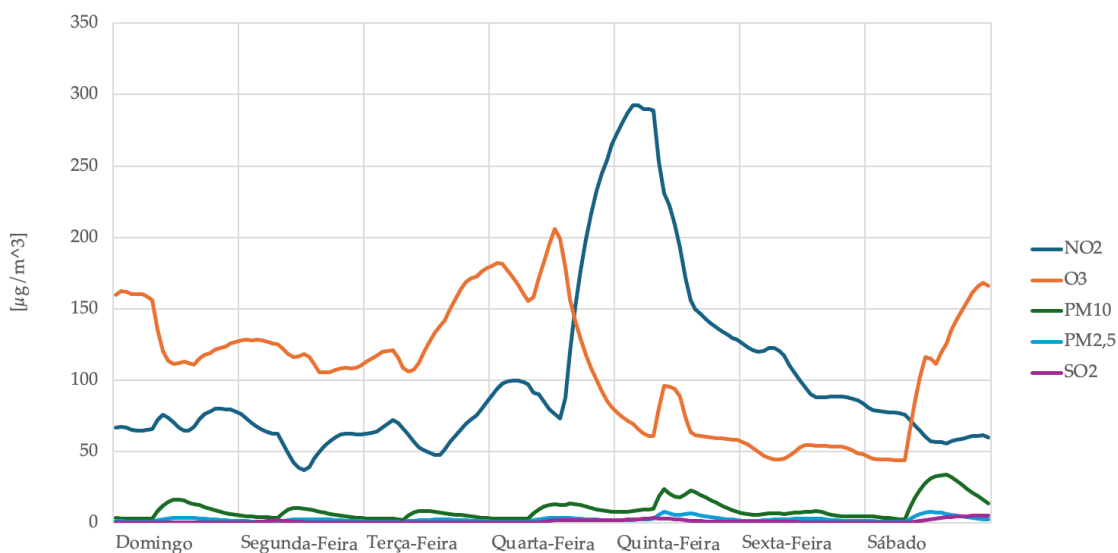


Figura 4.30 - Concentração de poluentes no interior da Sala D no decorrer da semana representativa de outono

A Tabela 4.17 permite a comparação da concentração de poluentes no ambiente interior dos compartimentos representativos, comparando-os com os limites recomendados pelo *Handbook ASHRAE 2015* para a conservação de materiais sensíveis, como obras de arte e peças

com cariz histórico. Os dados indicam que os níveis de vários poluentes estão acima dos limites propostos, representando um risco significativo para a preservação desses artefactos. Implementar medidas de mitigação tais como grelhas de admissão de ar com filtros torna-se imperativo para o prolongamento de vida destes objetos.

Tabela 4.17 - Concentração de poluentes no ambiente interior vs ASHRAE 2015 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| | | Inverno | Primavera | Verão | Outono | Média Anual |
|--------|-----------------|---------|-----------|-------|--------|-------------|
| Sala 1 | NO2 | 38,6 | 39,1 | 44,1 | 53,9 | 34,8 |
| | PM2.5 | 3,8 | 5,4 | 7,0 | 3,3 | 4,1 |
| | PM10 | 12,2 | 12,0 | 14,4 | 12,5 | 11,8 |
| | SO2 | 0,9 | 0,6 | 0,3 | 0,5 | 0,6 |
| | O3 | 49,0 | 75,1 | 86,3 | 53,5 | 51,7 |
| | Agregado | 104,4 | 132,2 | 152,1 | 123,7 | 103,0 |
| Salão | NO2 | 28,9 | 35,4 | 44,3 | 48,3 | 28,3 |
| | PM2.5 | 3,8 | 5,8 | 8,2 | 3,8 | 4,5 |
| | PM10 | 12,1 | 12,9 | 17,2 | 14,5 | 12,8 |
| | SO2 | 0,6 | 0,5 | 0,3 | 0,5 | 0,5 |
| | O3 | 39,2 | 64,9 | 84,3 | 51,5 | 46,3 |
| | Agregado | 84,6 | 119,5 | 154,3 | 118,7 | 92,3 |
| Sala D | NO2 | 24,0 | 70,2 | 68,9 | 101,2 | 45,6 |
| | PM2.5 | 1,9 | 4,5 | 5,8 | 2,4 | 2,9 |
| | PM10 | 5,8 | 9,8 | 11,7 | 9,3 | 8,2 |
| | SO2 | 0,4 | 1,2 | 0,6 | 0,9 | 0,8 |
| | O3 | 35,1 | 119,3 | 133,2 | 108,5 | 82,9 |
| | Agregado | 67,2 | 205,0 | 220,2 | 222,4 | 140,4 |

4.2.3.1 Sim_2.3.2 – Este / Oeste

A comparação entre as Figuras 4.26 e 4.31 indica uma mudança na configuração dos caminhos de fluxo de ar disponíveis devido ao fecho dos vãos na fachada de barlavento.

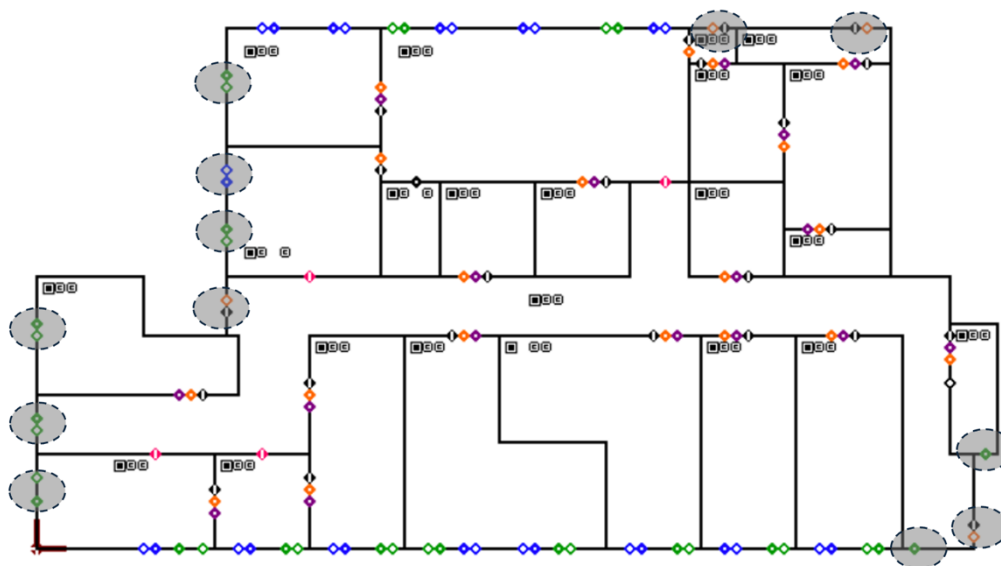


Figura 4.31 - Identificação dos caminhos de fluxo disponíveis para circulação de ar

Comparando os gráficos das Figura 4.28 e 4.33, constata-se uma redução dos valores de Rph obtidos na atual estratégia de ventilação cruzada. Na Figura 4.28, onde os vãos envidraçados posicionados na fachada de barlavento estavam abertos, o aproveitamento do efeito do vento é largamente superior, obtendo taxas de Rph mais elevadas. Em contraste, na Figura 4.33, o fecho dos vãos envidraçados na fachada de barlavento e abertura dos vãos destacados limitam o efeito do vento reduzindo as taxas de Rph. A presente observação destaca a importância da configuração e gestão adequada das aberturas de ventilação por forma a otimizar a eficiência energética e a QAI. A estratégia de ventilação cruzada, quando bem implementada com aberturas estrategicamente posicionadas e ajustadas conforme as condições climáticas, pode maximizar a ventilação natural. No entanto, o fecho de aberturas em certas condições meteorológicas pode comprometer esta eficiência. A Figura 4.32 exhibe os valores das médias mensais das renovações horárias do edifício, todos os valores situam-se abaixo do valor 0,25 h⁻¹. É notório que um sistema baseado apenas em ventilação natural não consegue dar resposta às necessidades mínimas impostas pela norma EN 15251.

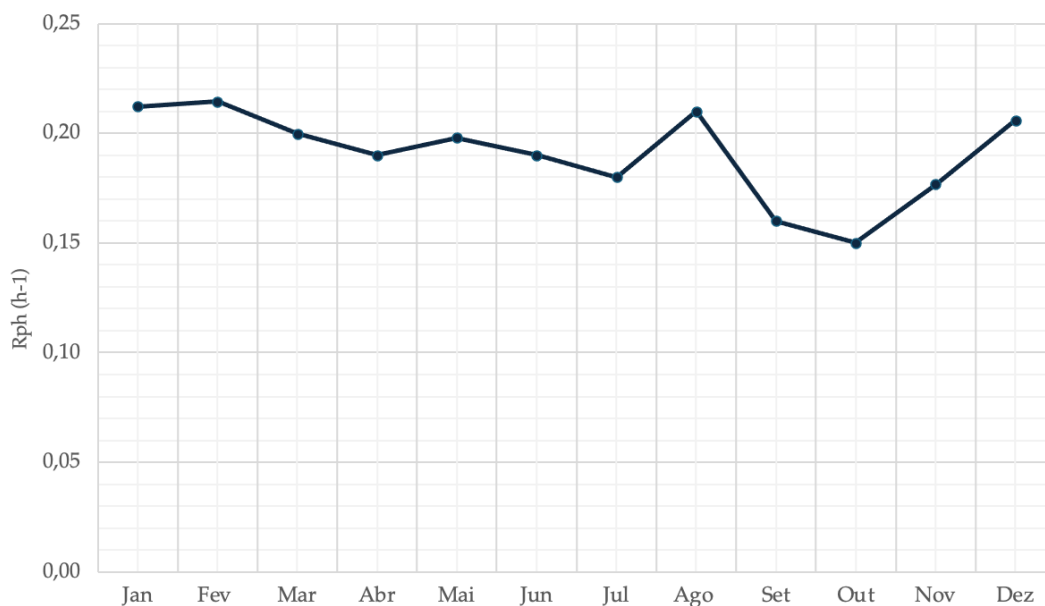


Figura 4.32 - Médias mensais dos valores de Rph ao longo de um ano

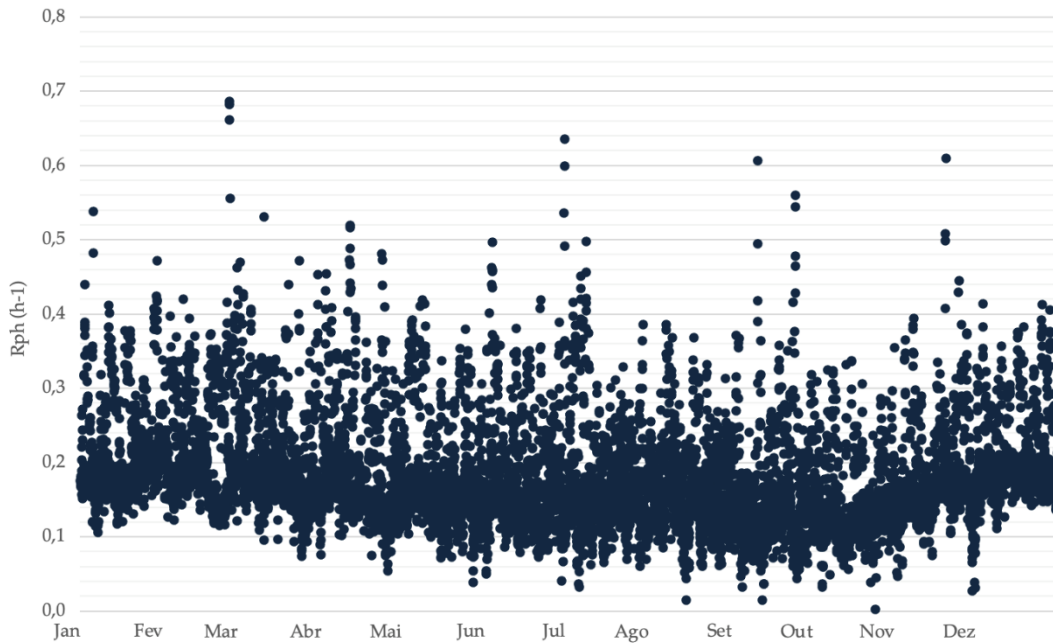


Figura 4.33 - Rph horário ao longo de um ano durante o período de fecho do museu

A Tabela 4.18 evidencia os fracos valores de renovações horárias obtidos na presente simulação, estão inseridos, na Categoria IV, praticamente a totalidade dos valores obtidos, atingindo uma percentagem de 99%.

Tabela 4.18 - Percentagem de valores de Rph em cada categoria da norma EN 15251

| Categoria I | Categoria II | Categoria III | Categoria IV |
|-------------|--------------|---------------|--------------|
| 0,0 | 0,0 | 0,1 | 99,9 |

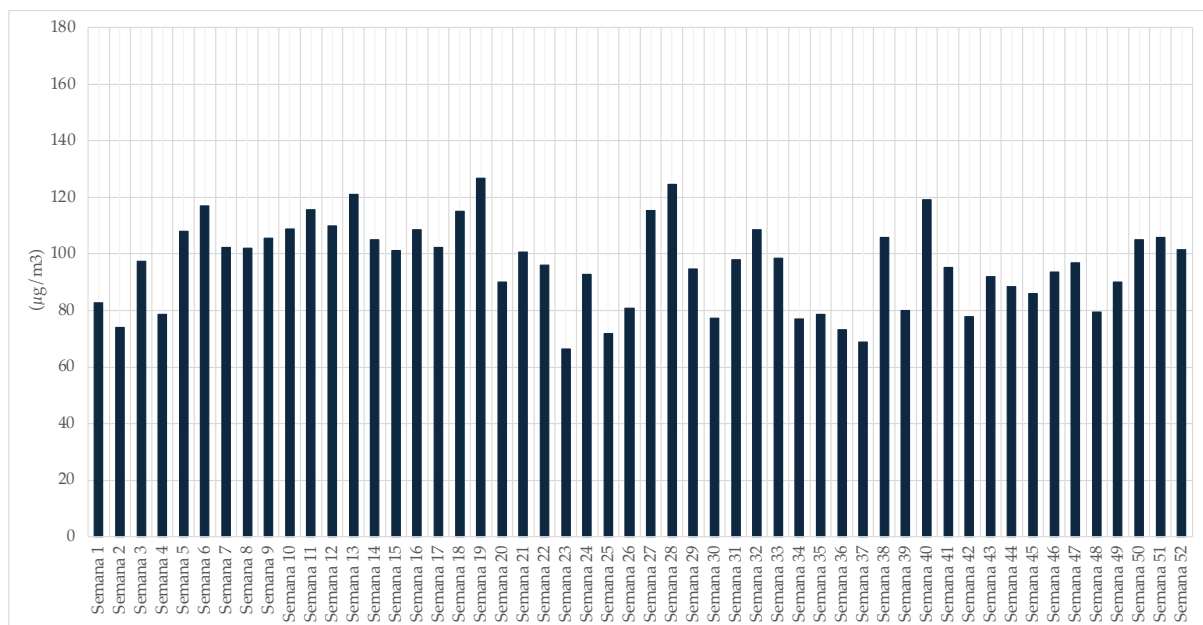


Figura 4.34 - Médias semanais da concentração de poluentes no interior do edifício ao longo de um ano

O gráfico da Figura 4.34 evidencia uma redução generalizada da concentração de poluentes no ambiente interior do edifício. Com a redução das renovações de ar existe também uma redução da entrada de poluentes ao longo do ano.

Tabela 4.19 - Comparação Sim_2.2.2 e Sim_2.3.1 relativamente à concentração de poluentes ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| | Semana 11 | Semana 19 | Semana 28 | Semana 40 |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Sim_2.3.1 | 120,0 | 140,7 | 132,0 | 143,6 |
| Sim_2.3.2 | 115,6 | 126,9 | 124,6 | 119,1 |
| Varição (%) | -3,7 | -9,8 | -5,6 | -17,1 |

A Tabela 4.19 permite quantificar a variação da concentração do aglomerado de poluentes no interior do edifício. Neste caso, é possível constatar uma redução em todas as semanas representativas.

Tabela 4.20 - Concentração de poluentes no ambiente interior vs Índice da Qualidade do Ar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| | | Inverno | Primavera | Verão | Outono | Média Anual |
|--------|-----------------|---------|-----------|-------|--------|-------------|
| Sala 1 | NO2 | 12,6 | 17,8 | 19,0 | 18,0 | 12,9 |
| | PM2.5 | 5,2 | 3,8 | 4,7 | 2,2 | 2,8 |
| | PM10 | 14,0 | 18,7 | 23,6 | 20,3 | 19,2 |
| | SO2 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,5 | 0,5 |
| | O3 | 55,7 | 72,6 | 83,6 | 55,9 | 52,8 |
| | Agregado | 88,1 | 113,4 | 131,2 | 96,9 | 88,3 |
| Salão | NO2 | 21,4 | 26,9 | 31,2 | 31,4 | 21,6 |
| | PM2.5 | 8,0 | 5,8 | 7,9 | 3,7 | 4,6 |
| | PM10 | 13,5 | 17,1 | 23,9 | 20,5 | 17,6 |
| | SO2 | 0,5 | 0,5 | 0,3 | 0,5 | 0,5 |
| | O3 | 50,5 | 66,7 | 84,9 | 51,9 | 47,9 |
| | Agregado | 93,9 | 117,0 | 148,2 | 108,0 | 92,2 |
| Sala D | NO2 | 17,7 | 24,8 | 26,0 | 26,5 | 20,8 |
| | PM2.5 | 8,2 | 5,3 | 6,6 | 3,2 | 4,2 |
| | PM10 | 11,2 | 18,4 | 21,2 | 20,3 | 19,9 |
| | SO2 | 0,6 | 0,8 | 0,3 | 0,4 | 0,6 |
| | O3 | 55,6 | 72,0 | 133,2 | 53,7 | 52,2 |
| | Agregado | 93,2 | 121,2 | 187,2 | 104,1 | 97,6 |

A Figura 4.35 permite a visualização da variação da concentração de cada poluente no interior do edifício na semana mais crítica (semana 28 – verão). Sugere ainda a existência de picos sucessivos ao longo de cada dia em praticamente todos os poluentes. É perceptível que existe um crescimento da concentração interior no decorrer do período da manhã atingindo o pico ao início da tarde. Estudos publicados indicam que as concentrações de O_3 e NO_2 tendem a atingir os seus picos durante a tarde devido ao aumento da radiação solar e à intensificação das reações fotoquímicas, especialmente em centros urbanos como Lisboa que apresenta influência do tráfego rodoviário, marítimo e aéreo [111, 112].

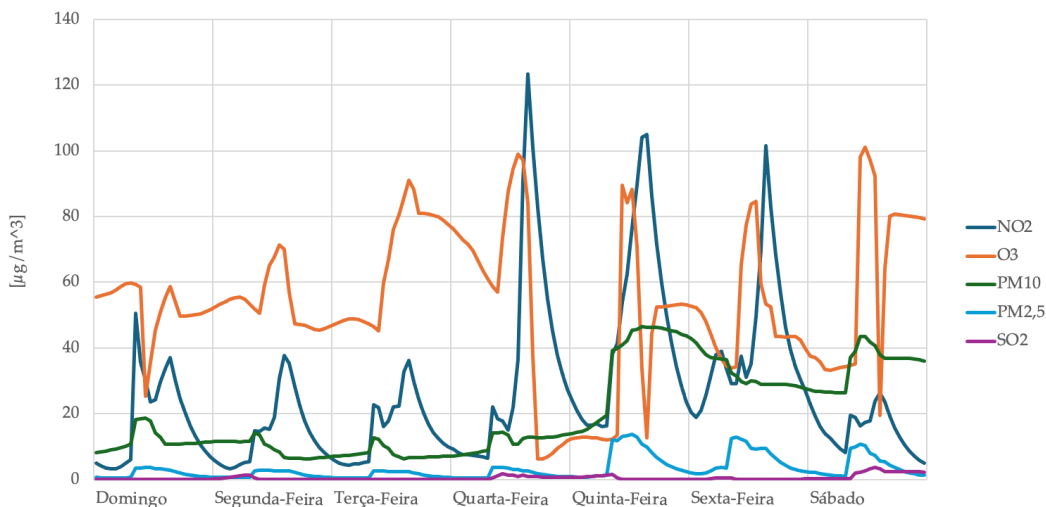


Figura 4.35 - Concentração de poluentes no interior da Sala D no decorrer da semana representativa de verão

A redução das taxas de renovação de ar pode ter um efeito positivo por reduzir a entrada de poluentes exteriores, especialmente em centros urbanos com taxas de poluição elevadas. Esta abordagem evidencia a importância de equilibrar eficazmente a ventilação natural para garantir uma boa qualidade do ar interior, realçando a necessidade de adaptação às condições específicas do ambiente e necessidades dos ocupantes. A Tabela 4.18 fornece dados quantitativos que demonstram a redução das concentrações de poluentes nos três compartimentos representativos do edifício tendo efeitos positivos na preservação dos objetos presentes no interior do edifício.

Tabela 4.21 - Concentração de poluentes no ambiente interior vs ASHRAE 2015 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| | | Inverno | Primavera | Verão | Outono | Média Anual |
|--------|-----------------|---------|-----------|-------|--------|-------------|
| Sala 1 | NO2 | 12,6 | 17,8 | 19,0 | 18,0 | 12,9 |
| | PM2.5 | 5,2 | 3,8 | 4,7 | 2,2 | 2,8 |
| | PM10 | 14,0 | 18,7 | 23,6 | 20,3 | 19,2 |
| | SO2 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,5 | 0,5 |
| | O3 | 55,7 | 72,6 | 83,6 | 55,9 | 52,8 |
| | Agregado | 88,1 | 113,4 | 131,2 | 96,9 | 88,3 |
| Salão | NO2 | 21,4 | 26,9 | 31,2 | 31,4 | 21,6 |
| | PM2.5 | 8,0 | 5,8 | 7,9 | 3,7 | 4,6 |
| | PM10 | 13,5 | 17,1 | 23,9 | 20,5 | 17,6 |
| | SO2 | 0,5 | 0,5 | 0,3 | 0,5 | 0,5 |
| | O3 | 50,5 | 66,7 | 84,9 | 51,9 | 47,9 |
| | Agregado | 93,9 | 117,0 | 148,2 | 108,0 | 92,2 |
| Sala D | NO2 | 17,7 | 24,8 | 26,0 | 26,5 | 20,8 |
| | PM2.5 | 8,2 | 5,3 | 6,6 | 3,2 | 4,2 |
| | PM10 | 11,2 | 18,4 | 21,2 | 20,3 | 19,9 |
| | SO2 | 0,6 | 0,8 | 0,3 | 0,4 | 0,6 |
| | O3 | 55,6 | 72,0 | 133,2 | 53,7 | 52,2 |
| | Agregado | 93,2 | 121,2 | 187,2 | 104,1 | 97,6 |

4.2.4 Sim_2.4 – Janelas Fechadas no Inverno

É um comportamento habitual e comum fechar os vãos envidraçados na estação de aquecimento e abrir na estação de arrefecimento. No presente subcapítulo, é principal objetivo estudar o impacto deste comportamento típico. Para além da programação dos vãos envidraçados, no período de inverno, as portas de acesso ao exterior adquirem a programação de abertura e fecho coincidente com o horário de funcionamento do museu. As Figuras 4.36 e 4.37 exibem as renovações por hora interiores.

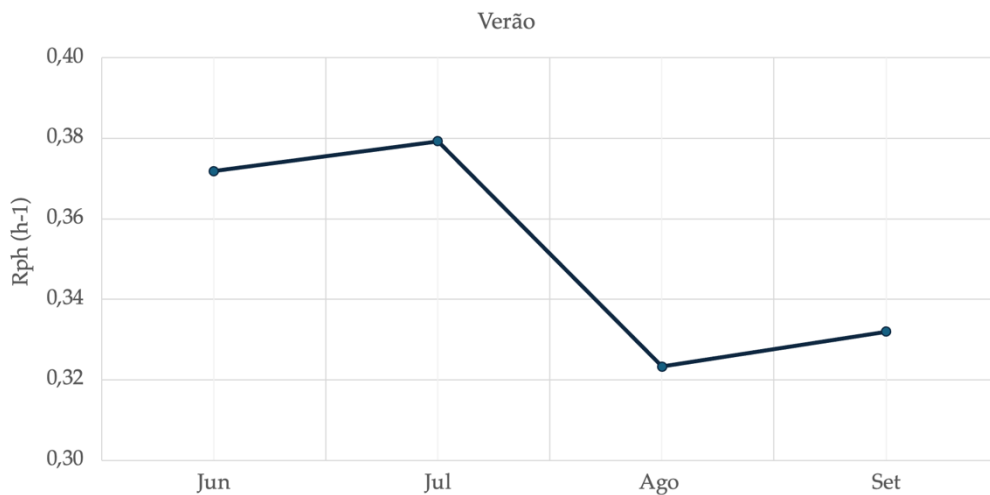


Figura 4.36 - Médias mensais dos valores de Rph ao longo dos meses de verão

A Figura 4.36 diz respeito aos valores obtidos quando os vãos envidraçados estão abertos durante a estação de arrefecimento, sendo possível constatar que o pico é atingido no mês de julho ($0,38h^{-1}$). Por outro lado, a Figura 4.37 retrata a situação no decorrer do período de fecho do museu em que a maioria dos vãos envidraçados são naturalmente fechados. Os valores continuam baixos, na sequência do retratado anteriormente.

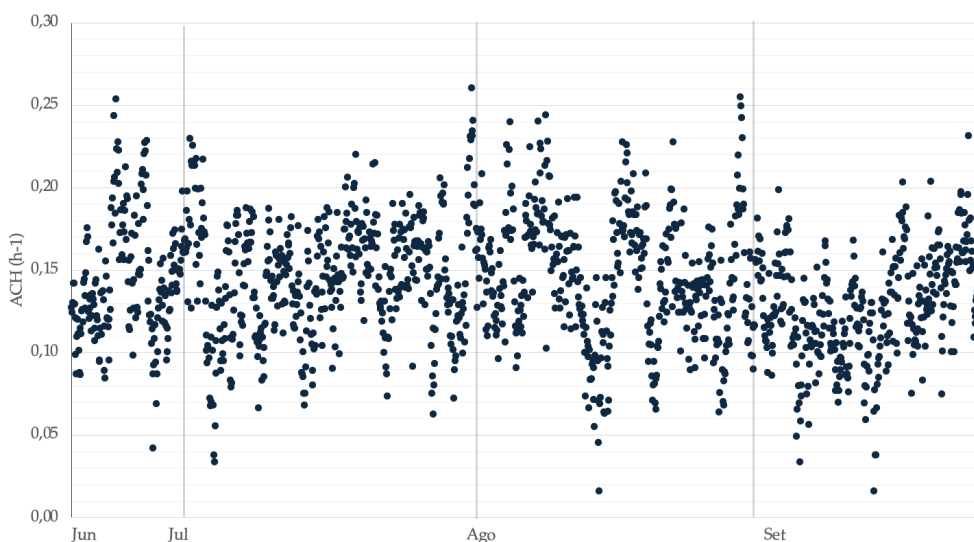


Figura 4.37 - Rph horário ao longo dos meses de verão

Analisando a Tabela 4.22 é possível concluir que mesmo com os vãos envidraçados abertos as condições de ventilação não são suficientes para responder às condições mínimas impostas pela EN 15251; sendo que apenas 7% dos valores estão na Categoria II. Esta conclusão eleva a necessidade da adoção de sistemas de ventilação mecânica por forma a atingir as necessidades de ventilação do edifício.

Tabela 4.22 - Percentagem de valores de Rph para cada categoria da norma EN 15251

| Categoria I | Categoria II | Categoria III | Categoria IV |
|-------------|--------------|---------------|--------------|
| 0,0 | 7,3 | 22,6 | 70,1 |

A Figura 4.38 apresenta uma análise detalhada da média da concentração do agregado de poluentes no interior do edifício ao longo do período de verão.

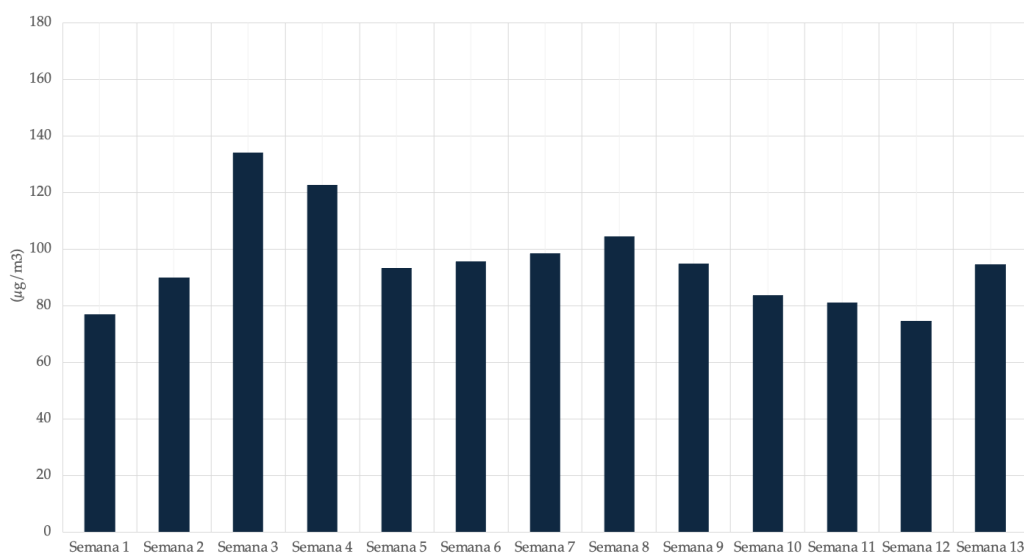


Figura 4.38 - Médias semanais da concentração de poluentes no interior do edifício ao longo dos meses de verão

Observa-se que, especificamente nas semanas 3 e 4, os níveis de concentração de poluentes atingem os seus valores mais elevados. Esta tendência pode ser atribuída a diversos fatores, tais como a variação das condições meteorológicas, aumento da concentração de poluentes no exterior ou diminuição da eficácia do sistema de ventilação adotado. Estes dados são cruciais para a compreensão da dinâmica de poluição interna e posterior implementação de medidas corretivas que visem a melhoria da qualidade do ar interior. Seleccionadas as semanas 3 e 4 para realizar uma análise detalhada de cada poluente, é apresentada a Tabela 4.23. A análise dos dados permite concluir que, na grande maioria dos casos, os poluentes apresentam concentrações inferiores aos valores considerados “Muito bom” ou “Bom” pelo “Índice da Qualidade do Ar”. A única exceção encontrada foi no compartimento “Sala D”, que na semana 3, registou um grau “Médio” para a concentração de ozono. Esta exceção sugere a

necessidade de uma investigação mais aprofundada das condições específicas desta sala durante o período mencionado, de modo a identificar e mitigar possíveis problemas.

Tabela 4.23 - Concentração de poluentes no ambiente interior vs Índice da Qualidade do Ar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| | | Semana 3 | Semana 4 | Média Verão |
|--------|-----------------|----------|----------|-------------|
| Sala 1 | NO2 | 43,3 | 30,9 | 24,0 |
| | PM2.5 | 7,3 | 4,8 | 4,2 |
| | PM10 | 15,2 | 12,2 | 10,7 |
| | SO2 | 0,3 | 0,6 | 0,3 |
| | O3 | 80,4 | 57,9 | 58,1 |
| | Agregado | 146,6 | 106,5 | 97,3 |
| Salão | NO2 | 43,0 | 28,7 | 24,4 |
| | PM2.5 | 8,0 | 6,4 | 5,0 |
| | PM10 | 16,9 | 15,8 | 12,6 |
| | SO2 | 0,3 | 0,7 | 0,3 |
| | O3 | 83,5 | 57,7 | 59,5 |
| | Agregado | 151,8 | 109,3 | 101,7 |
| Sala D | NO2 | 57,5 | 28,7 | 33,0 |
| | PM2.5 | 8,0 | 6,4 | 4,7 |
| | PM10 | 16,9 | 13,2 | 11,7 |
| | SO2 | 0,3 | 0,6 | 0,3 |
| | O3 | 110,7 | 80,8 | 81,8 |
| | Agregado | 193,5 | 129,7 | 131,6 |

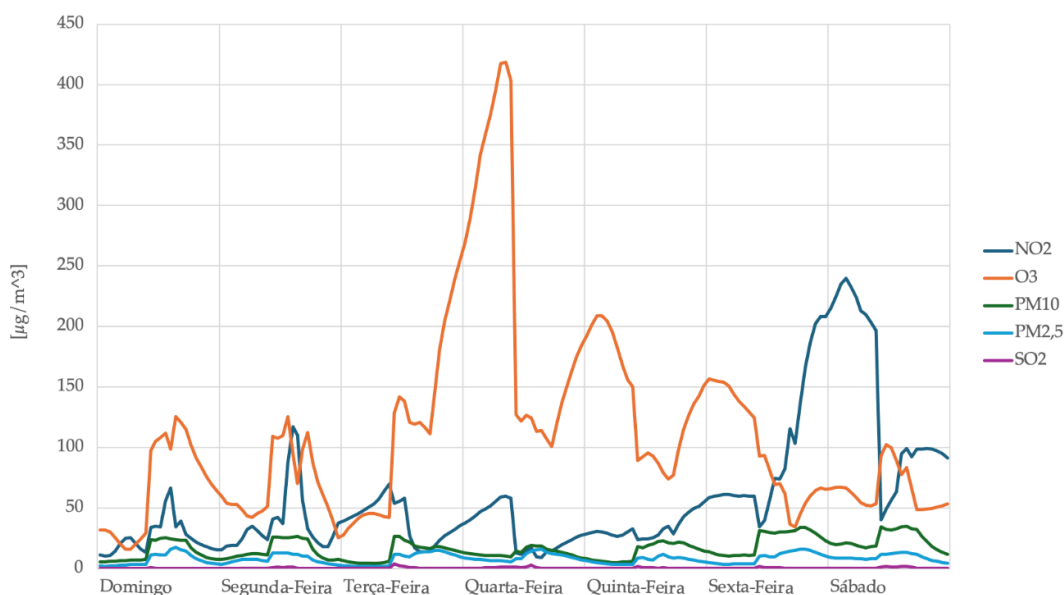


Figura 4.39 - Variação da concentração de poluentes no interior da Sala D no decorrer da semana 3

Após a conclusão de que a “Sala D” é a mais afetada pela concentração de poluentes, a Figura 4.39 exhibe a variação ao longo da semana 3 das cinco espécies de poluentes, permitindo uma análise detalhada e singular das flutuações registadas. Observa-se que o pico dos valores de ozono pode estar associado a um evento particular de emissão deste poluente neste dia específico, uma vez que os restantes valores são consideravelmente inferiores.

Tabela 4.24 - Concentração de poluentes no ambiente interior vs ASHRAE 2015 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| | | Semana 3 | Semana 4 | Média Verão |
|--------|-----------------|----------|----------|-------------|
| Sala 1 | NO2 | 43,3 | 30,9 | 24,0 |
| | PM2.5 | 7,3 | 4,8 | 4,2 |
| | PM10 | 15,2 | 12,2 | 10,7 |
| | SO2 | 0,3 | 0,6 | 0,3 |
| | O3 | 80,4 | 57,9 | 58,1 |
| | Agregado | 146,6 | 106,5 | 97,3 |
| Salão | NO2 | 43,0 | 28,7 | 24,4 |
| | PM2.5 | 8,0 | 6,4 | 5,0 |
| | PM10 | 16,9 | 15,8 | 12,6 |
| | SO2 | 0,3 | 0,7 | 0,3 |
| | O3 | 83,5 | 57,7 | 59,5 |
| | Agregado | 151,8 | 109,3 | 101,7 |
| Sala D | NO2 | 57,5 | 28,7 | 33,0 |
| | PM2.5 | 8,0 | 6,4 | 4,7 |
| | PM10 | 16,9 | 13,2 | 11,7 |
| | SO2 | 0,3 | 0,6 | 0,3 |
| | O3 | 110,7 | 80,8 | 81,8 |
| | Agregado | 193,5 | 129,7 | 131,6 |

Apesar dos níveis aceitáveis no que diz respeito à saúde dos ocupantes, as concentrações dos poluentes O_3 , NO_2 e PM_{10} continuam acima dos valores recomendados para a preservação de materiais sensíveis presentes num museu. Este facto é preocupante, pois a exposição prolongada a níveis elevados destes poluentes pode acelerar a degradação de obras de arte, documentos históricos e outros artefactos sensíveis.

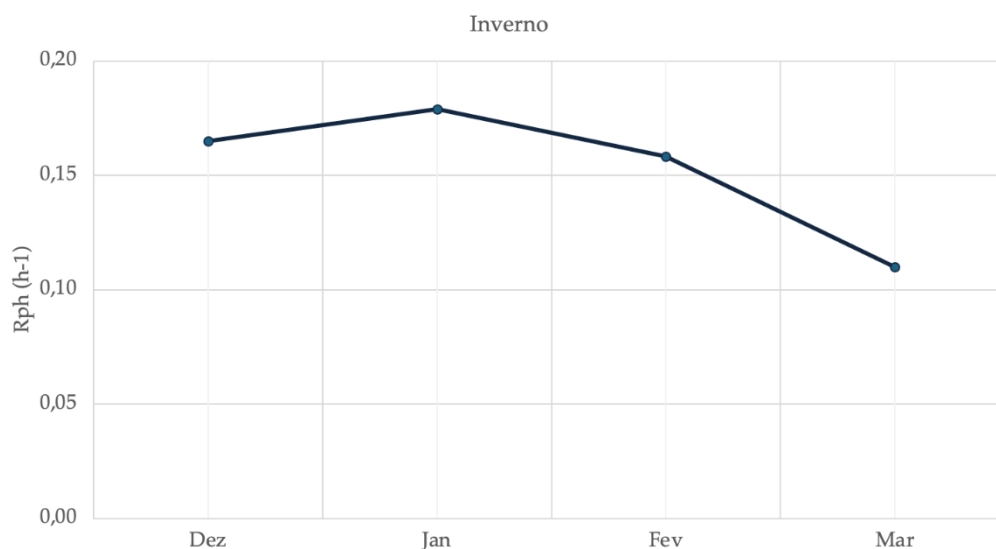


Figura 4.40 - Médias mensais dos valores de Rph ao longo do inverno

Iniciando o estudo do período de inverno, é importante referir que os vãos envidraçados permanecem fechados durante todo este período, enquanto as portas de acesso exterior seguem uma programação de abertura e fecho coincidente com o horário de funcionamento do

museu. A Figura 4.40 retrata os valores das taxas de renovação de ar ao longo dos meses de inverno, evidenciando valores consideravelmente inferiores com comparação com o verão, devido ao fecho dos vãos envidraçados.

Tabela 4.25 - Percentagem de valores de Rph para cada categoria da norma EN 15251

| Categoria I | Categoria II | Categoria III | Categoria IV |
|-------------|--------------|---------------|--------------|
| 0,0 | 0,0 | 0,0 | 100 |

Relativamente à Tabela 4.25, uma vez que durante o inverno os vãos envidraçados permanecem fechados os valores de renovações horárias são muito reduzidos levando à presença da totalidade dos valores na Categoria IV. Esta condição específica influencia diretamente as taxas de renovação de ar do edifício, já que existe uma clara limitação ao fluxo de ar entre o interior e exterior. Conclui-se que é imperativa a utilização de mecanismos de ventilação mecânica para assegurar um ambiente interior de qualidade.

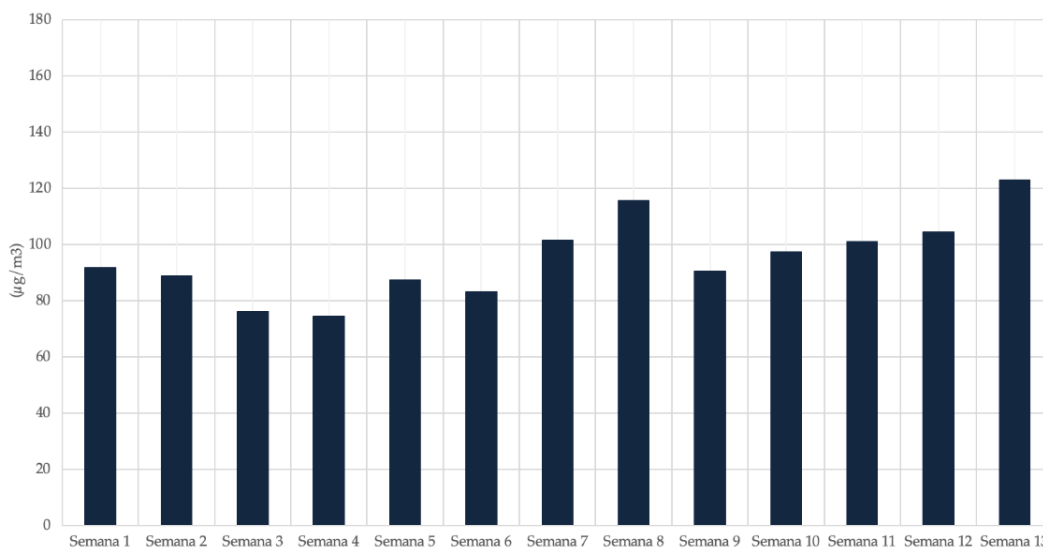


Figura 4.41 - Médias semanais da concentração de poluentes no interior do edifício ao longo do inverno

Analisando a Figura 4.41, é possível identificar as semanas 8 e 13 como aquelas que apresentam os maiores valores acumulados de concentração de poluentes no ambiente interior do edifício. Ao selecionar os compartimentos representativos e executar uma análise detalhada e singular de cada espécie de poluente, conclui-se que não há registo de nenhuma concentração inferior ao grau “Bom”. Estes resultados podem ser justificados pela redução das taxas de renovação de ar, uma vez que a menor entrada de ar resulta em menor introdução de poluentes no ambiente interior do edifício. É importante sublinhar a importância desta conclusão por forma a assegurar a QAI.

Tabela 4.26 - Concentração de poluentes no ambiente interior vs Índice da Qualidade do Ar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| | | Semana 8 | Semana 13 | Média Inverno |
|--------|-----------------|----------|-----------|---------------|
| Sala 1 | NO2 | 56,6 | 26,4 | 38,1 |
| | PM2.5 | 6,9 | 6,3 | 4,2 |
| | PM10 | 15,1 | 25,1 | 10,6 |
| | SO2 | 0,4 | 0,6 | 0,7 |
| | O3 | 33,9 | 53,5 | 40,8 |
| | Agregado | 112,9 | 111,9 | 94,3 |
| Salão | NO2 | 58,0 | 26,2 | 39,1 |
| | PM2.5 | 9,6 | 7,1 | 6,1 |
| | PM10 | 21,1 | 33,8 | 15,2 |
| | SO2 | 0,4 | 0,6 | 0,7 |
| | O3 | 32,3 | 51,6 | 40,3 |
| | Agregado | 121,4 | 119,3 | 101,4 |
| Sala D | NO2 | 61,4 | 26,3 | 38,2 |
| | PM2.5 | 6,0 | 7,1 | 3,9 |
| | PM10 | 13,2 | 28,1 | 9,7 |
| | SO2 | 0,5 | 0,4 | 0,6 |
| | O3 | 31,8 | 51,6 | 40,5 |
| | Agregado | 113,0 | 113,5 | 93,0 |

A Tabela 4.26 apresenta evidências de melhorias na concentração interior de poluentes, especialmente no que diz respeito ao material particulado PM_{10} , quando comparado com o período de verão. Esta observação sugere que, ao longo das diferentes estações do ano, existe uma redução ou aumento significativo dos diferentes poluentes. O aumento da concentração de certos poluentes, na presente simulação, pode ser explicado pelo facto de, com os vãos envidraçados fechados, a entrada de poluentes exteriores está limitada, mas a sua saída também é restringida.

Tabela 4.27 - Concentração de poluentes no ambiente interior vs ASHRAE 2015 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| | | Semana 8 | Semana 13 | Média Inverno |
|--------|-----------------|----------|-----------|---------------|
| Sala 1 | NO2 | 56,6 | 26,4 | 38,1 |
| | PM2.5 | 6,9 | 6,3 | 4,2 |
| | PM10 | 15,1 | 25,1 | 10,6 |
| | SO2 | 0,4 | 0,6 | 0,7 |
| | O3 | 33,9 | 53,5 | 40,8 |
| | Agregado | 112,9 | 111,9 | 94,3 |
| Salão | NO2 | 58,0 | 26,2 | 39,1 |
| | PM2.5 | 9,6 | 7,1 | 6,1 |
| | PM10 | 21,1 | 33,8 | 15,2 |
| | SO2 | 0,4 | 0,6 | 0,7 |
| | O3 | 32,3 | 51,6 | 40,3 |
| | Agregado | 121,4 | 119,3 | 101,4 |
| Sala D | NO2 | 61,4 | 26,3 | 38,2 |
| | PM2.5 | 6,0 | 7,1 | 3,9 |
| | PM10 | 13,2 | 28,1 | 9,7 |
| | SO2 | 0,5 | 0,4 | 0,6 |
| | O3 | 31,8 | 51,6 | 40,5 |
| | Agregado | 113,0 | 113,5 | 93,0 |

A análise destes dados é crucial por forma a compreender padrões e desenvolver estratégias eficazes de ventilação e mitigação. É importante referir que a ventilação natural, embora seja de muito baixo impacto energético, dificulta o controlo do impacto de poluentes exteriores na qualidade do ar interior. O conjunto de simulações apresentado de seguida pretende analisar com maior detalhe a particularidade de fecho e abertura de vãos envidraçados em diferentes horários, não se focando apenas no aspeto sazonal.

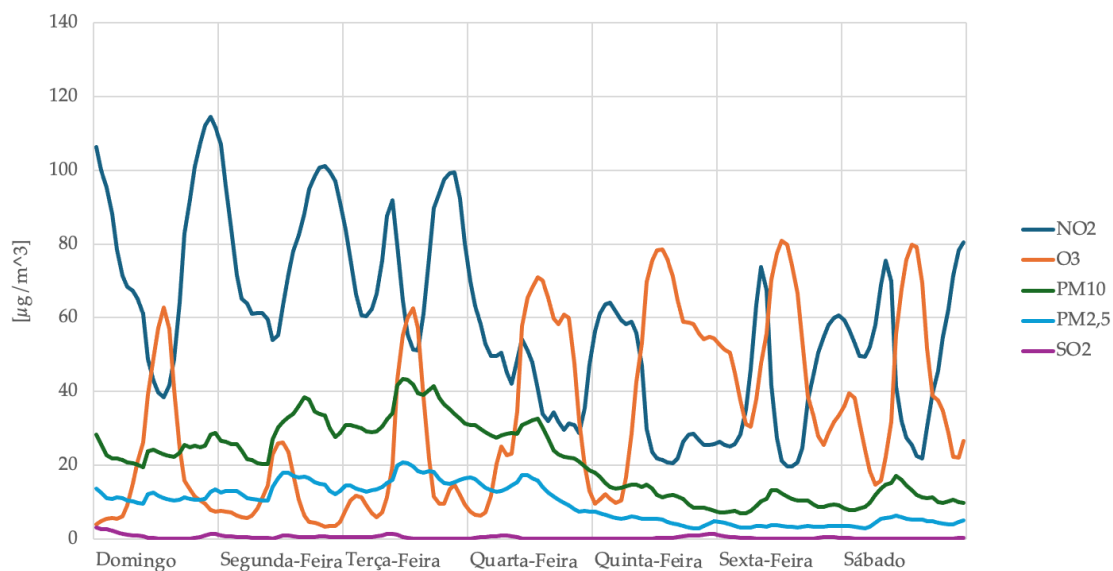


Figura 4.42 - Variação da concentração de poluentes no interior do Salão no decorrer da Semana 8

4.2.5 Sim_2.5 – Ventilação Noturna

O presente conjunto de simulações tem como objetivo estudar aspetos particularidades que ainda não foram abordadas. A Sim_2.5.1 pretende inverter o processo habitual de abertura dos vãos envidraçados durante o período de funcionamento do museu. Nesta simulação, os vãos envidraçados são programados para fecharem durante o horário de funcionamento e abrirem durante o período em que o museu se encontra fechado ao público. As portas interiores permanecem, na sua maioria, abertas, enquanto as portas exteriores seguem a programação de abertura e fecho do museu. Esta abordagem visa avaliar o impacto desta inversão no comportamento de introdução de poluentes no interior do edifício, com o objetivo de concluir possíveis melhorias na gestão da ventilação e conservação de materiais sensíveis.

A Sim_2.5.2 pretende apresentar um regime misto em que os vãos envidraçados são abertos parcialmente durante o período diurno (horário de funcionamento) e totalmente abertos durante o período noturno (horário de fecho).

4.2.5.1 Sim_2.5.1

Na Figura 4.43 são observados os valores médios mensais das taxas de renovação de ar recorrendo a uma estratégia em que os vãos envidraçados estão fechados durante o horário de funcionamento do museu e abertos durante o período de fecho. Não se verifica qualquer redução dos valores; pelo contrário, há um aumento significativo ao longo de todo o ano. Esta conclusão pode estar associada a um maior período de abertura dos vãos visto que o período de fecho engloba mais horas ao longo do dia (16h) comparativamente com o horário de funcionamento (8h).

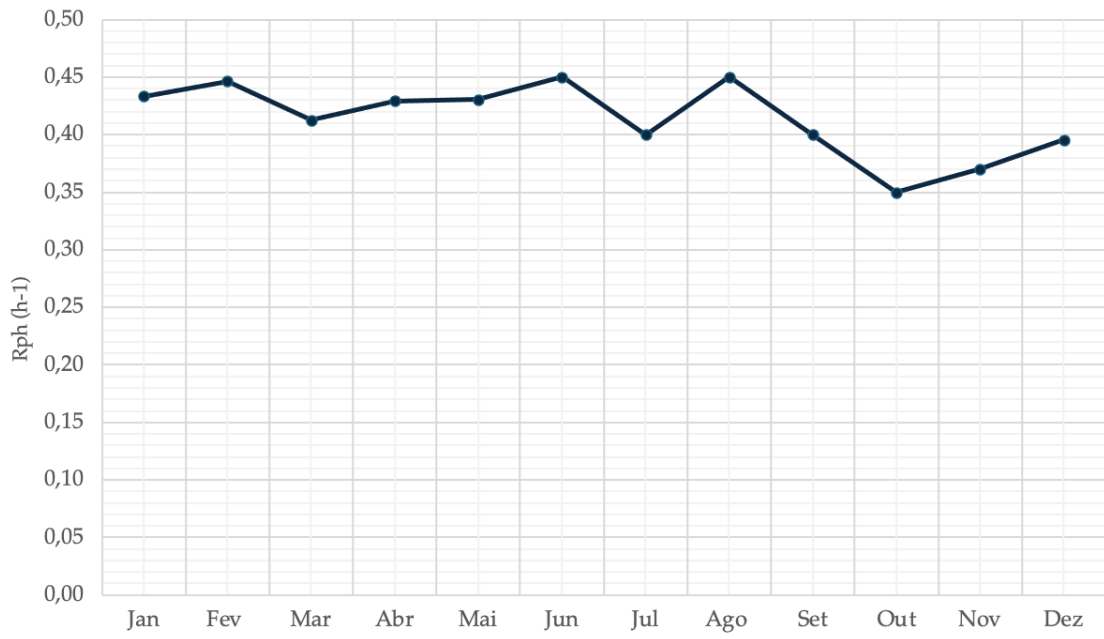


Figura 4.43 - Médias mensais dos valores de Rph ao longo de um ano

A Figura 4.44 ilustra os valores de Rph ao longo de um ano durante o período de funcionamento do museu. A média mensal dos valores de Rph é constante ao longo do ano o que traduz um menor impacto das variações sazonais nesta estratégia de ventilação. Constata-se também que a média dos valores é superior às restantes simulações sendo o valor mais baixo de 0,35 h⁻¹ em outubro.

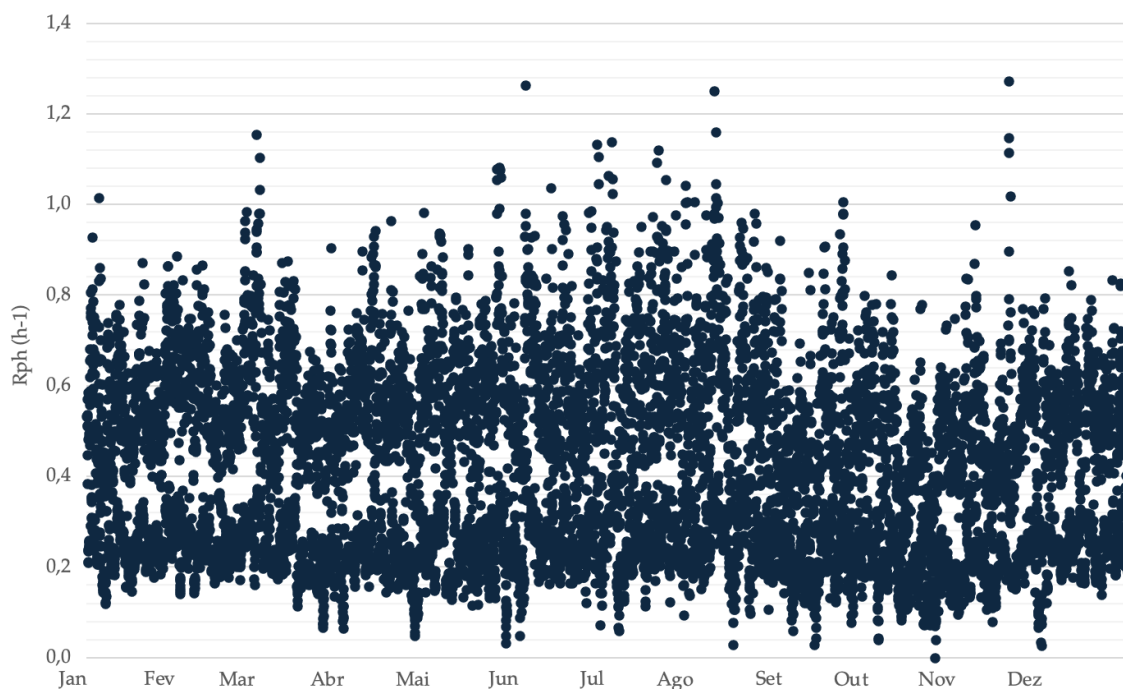


Figura 4.44 - Valores de Rph horários durante o período de funcionamento do museu ao longo de um ano

A Figura 4.44 permite concluir que a ventilação noturna contribui fortemente para maiores renovações horárias com valores a ultrapassarem as $0,8 \text{ h}^{-1}$. A presente análise é fundamental para compreender a dinâmica da ventilação no interior do ambiente do museu por forma a assegurar a melhor QAI possível. A simulação atual proporciona uma nova perspectiva sobre a gestão da ventilação, destacando a importância do equilíbrio adequado por forma a preservar tanto as coleções presentes no museu como a saúde e conforto de todos os visitantes e funcionários.

Apesar do aumento das taxas de renovação horária os valores ficam abaixo do que é considerado razoável. Na Tabela 4.28, constata-se que o edifício melhora as condições de ventilação sendo que alguns valores estão enquadrados na categoria II e III mas ainda assim a grande maioria está enquadrada na Categoria IV (valores abaixo do aceitável).

Tabela 4.28 - Percentagem de valores de Rph para cada categoria da norma EN 15251

| Categoria I | Categoria II | Categoria III | Categoria IV |
|-------------|--------------|---------------|--------------|
| 0,0 | 0,6 | 15,2 | 84,2 |

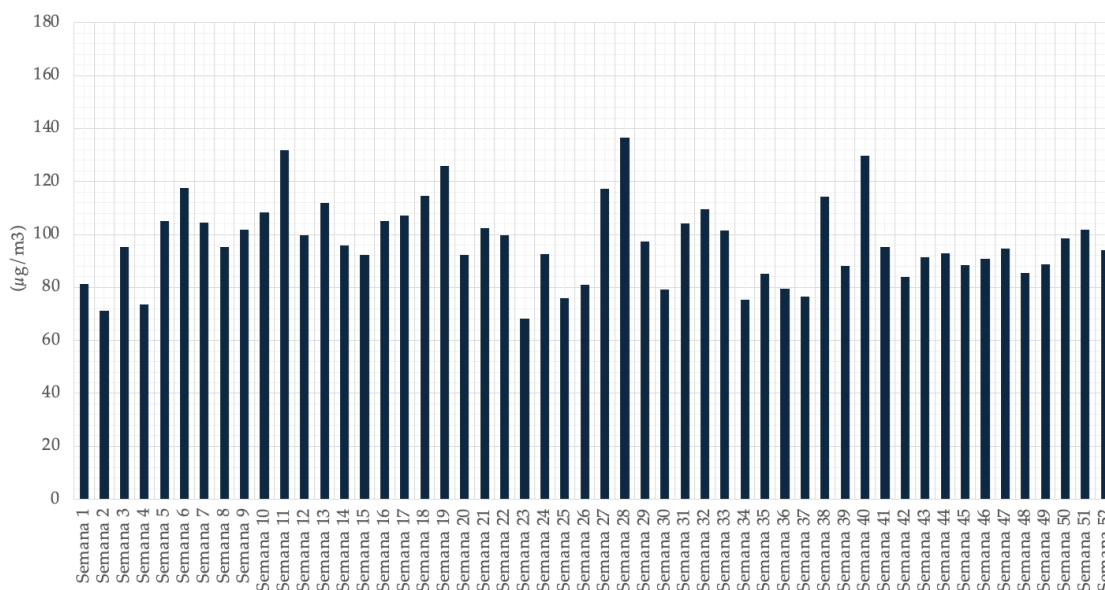


Figura 4.45 - Médias semanais da concentração de poluentes no interior do edifício ao longo de um ano

Dando início à análise dos poluentes no interior do edifício, a Figura 4.45 exhibe as concentrações dos aglomerados de poluentes no ambiente interior. As concentrações médias seguem a linha de tendência das restantes simulações até aqui. É importante referir que nenhuma semana ultrapassa a concentração média de $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para o conjunto de poluentes. A análise detalhada revela que a semana 28, mais uma vez, apresenta a maior concentração de poluentes no interior do edifício. Esta observação é consistente com os dados de outras simulações, indicando um padrão recorrente de acumulação de poluentes durante o período de verão. Selecionando os compartimentos representativos e com maior taxa de concentração de poluentes no seu interior é obtida a Tabela 4.26. A presente simulação conclui que a ventilação noturna é benéfica para a QAI, para além de no período de verão ajudar à dissipação da carga térmica acumulada pelo edifício durante o dia. Nenhum compartimento apresenta valores de concentração inferiores a “Bom”. O valor mais elevado está presente no compartimento “Sala D” no decorrer da semana 28, representativa do verão.

Tabela 4.29 - Concentração de poluentes no ambiente interior vs Índice da Qualidade do Ar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| | | Inverno | Primavera | Verão | Outono | Média Anual |
|--------|-----------------|---------|-----------|-------|--------|-------------|
| Sala 1 | NO2 | 30,7 | 44,8 | 42,0 | 44,6 | 30,5 |
| | PM2.5 | 5,2 | 7,4 | 8,7 | 4,2 | 5,5 |
| | PM10 | 16,0 | 15,8 | 19,6 | 16,3 | 15,5 |
| | SO2 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,5 |
| | O3 | 51,4 | 62,8 | 78,0 | 50,1 | 50,5 |
| | Agregado | 103,6 | 131,3 | 148,7 | 115,8 | 102,6 |
| Salão | NO2 | 31,3 | 42,7 | 44,5 | 45,6 | 30,7 |
| | PM2.5 | 5,6 | 7,8 | 9,4 | 4,5 | 5,5 |
| | PM10 | 17,4 | 16,7 | 21,1 | 17,6 | 16,8 |
| | SO2 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,5 |
| | O3 | 50,5 | 65,3 | 78,9 | 49,4 | 50,6 |
| | Agregado | 105,2 | 133,1 | 154,4 | 117,7 | 104,2 |
| Sala D | NO2 | 27,9 | 42,7 | 44,5 | 45,6 | 32,0 |
| | PM2.5 | 5,1 | 7,4 | 8,5 | 4,3 | 5,5 |
| | PM10 | 15,7 | 15,7 | 19,6 | 16,5 | 15,6 |
| | SO2 | 0,3 | 0,4 | 0,8 | 0,7 | 0,6 |
| | O3 | 45,6 | 61,7 | 86,0 | 59,7 | 54,6 |
| | Agregado | 94,7 | 128,0 | 159,4 | 126,8 | 108,3 |

Concluída a análise relativa ao conforto e saúde dos utilizadores, inicia-se a avaliação dos parâmetros do *ASHRAE Handbook 2015* para a preservação do material histórico e/ou cultural presente num museu. A Tabela 4.30 apresenta valores que estão em consonância com as conclusões e análises anteriores, destacando que os poluentes NO_2 , O_3 e PM_{10} são os que mais impactam o ambiente interior e, conseqüentemente, as coleções presentes no seu recheio.

Como referido anteriormente o dióxido de azoto e o ozono são dois agentes de deterioração de materiais orgânicos e inorgânicos que contribuem fortemente para o processo de degradação dos materiais. O material particulado PM_{10} deposita-se nas superfícies dos materiais contribuindo para a abrasão e escurecimento das superfícies.

Tabela 4.30 - Concentração de poluentes no ambiente interior vs ASHRAE 2015 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| | | Inverno | Primavera | Verão | Outono | Média Anual |
|--------|-----------------|---------|-----------|-------|--------|-------------|
| Sala 1 | NO2 | 30,7 | 44,8 | 42,0 | 44,6 | 30,5 |
| | PM2.5 | 5,2 | 7,4 | 8,7 | 4,2 | 5,5 |
| | PM10 | 16,0 | 15,8 | 19,6 | 16,3 | 15,5 |
| | SO2 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,5 |
| | O3 | 51,4 | 62,8 | 78,0 | 50,1 | 50,5 |
| | Agregado | 103,6 | 131,3 | 148,7 | 115,8 | 102,6 |
| Salão | NO2 | 31,3 | 42,7 | 44,5 | 45,6 | 30,7 |
| | PM2.5 | 5,6 | 7,8 | 9,4 | 4,5 | 5,5 |
| | PM10 | 17,4 | 16,7 | 21,1 | 17,6 | 16,8 |
| | SO2 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,5 |
| | O3 | 50,5 | 65,3 | 78,9 | 49,4 | 50,6 |
| | Agregado | 105,2 | 133,1 | 154,4 | 117,7 | 104,2 |
| Sala D | NO2 | 27,9 | 42,7 | 44,5 | 45,6 | 32,0 |
| | PM2.5 | 5,1 | 7,4 | 8,5 | 4,3 | 5,5 |
| | PM10 | 15,7 | 15,7 | 19,6 | 16,5 | 15,6 |
| | SO2 | 0,3 | 0,4 | 0,8 | 0,7 | 0,6 |
| | O3 | 45,6 | 61,7 | 86,0 | 59,7 | 54,6 |
| | Agregado | 94,7 | 128,0 | 159,4 | 126,8 | 108,3 |

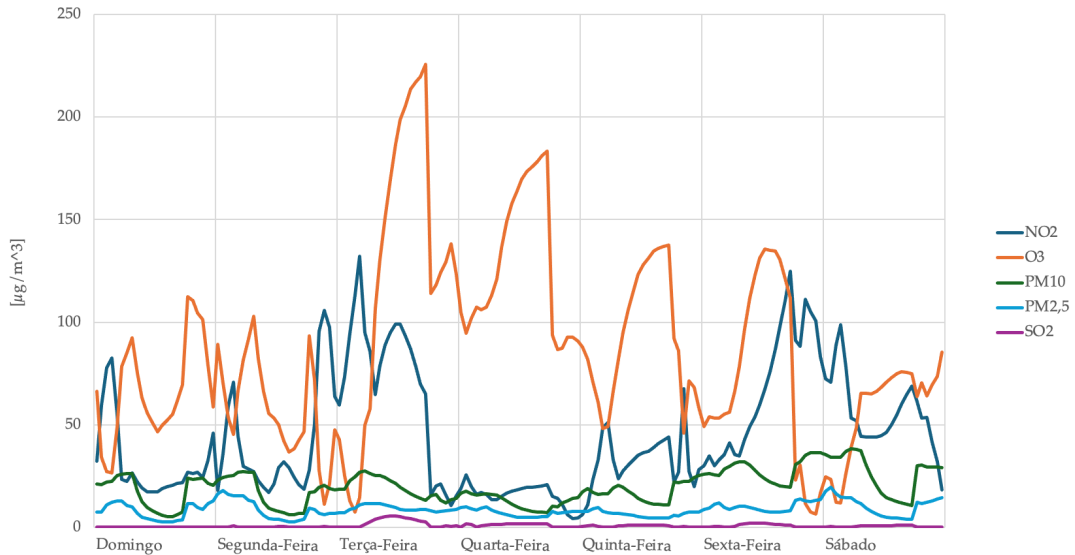


Figura 4.46 - Variação da concentração de poluentes no interior da Sala D durante a Semana 28 (verão)

4.2.5.2 Sim_2.5.2

Por forma a transmitir para o programa os requisitos pretendidos na presente simulação, elaborou-se uma programação específica para os vãos envidraçados. A Figura 4.47 exhibe essa programação na interface do programa, de modo que, durante o período de funcionamento do museu, os vãos envidraçados estejam abertos a 25% da sua capacidade máxima de abertura. Durante o período noturno, os vãos envidraçados são totalmente abertos, aproveitando fatores como a brisa marítima que se faz sentir na região de Lisboa, especialmente no verão. A programação detalhada dos vãos envidraçados é uma componente essencial para que seja possível estudar cada estratégia ou mecanismo de ventilação natural.

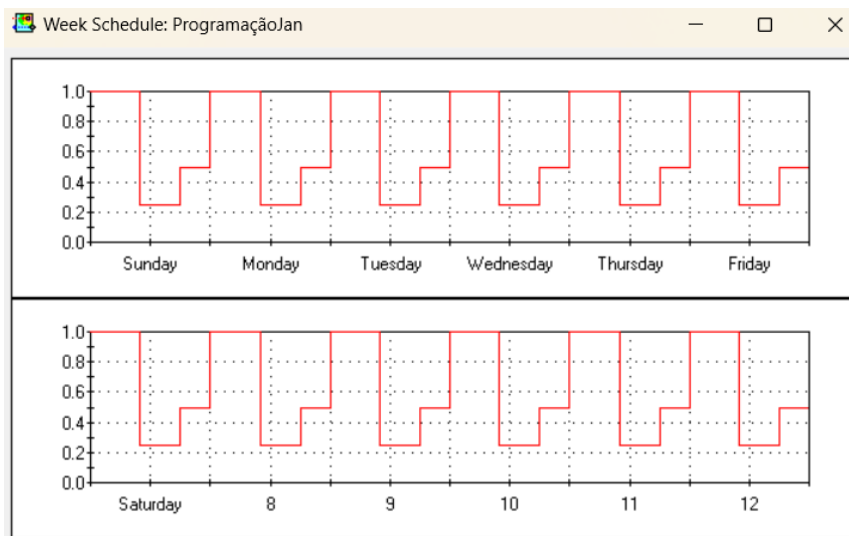


Figura 4.47 - Programação vãos envidraçados

A Figura 4.48 exibe os elevados valores de Rph do edifício permitindo concluir que não existe uma variação expressiva dos valores comparativamente com a simulação anterior.

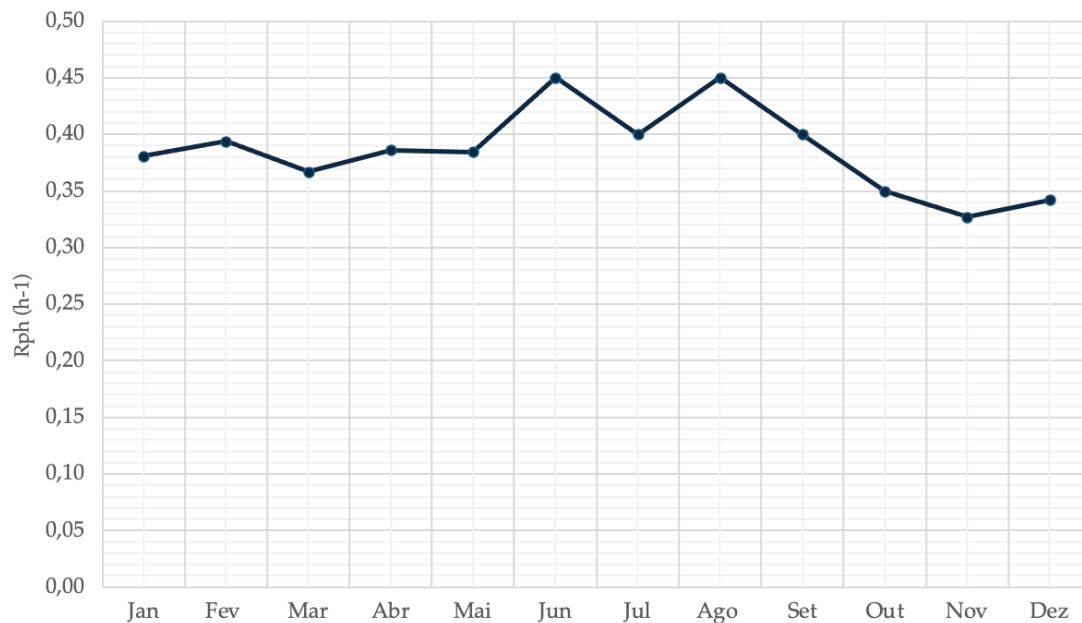


Figura 4.48 - Médias mensais dos valores de ACH ao longo de um ano

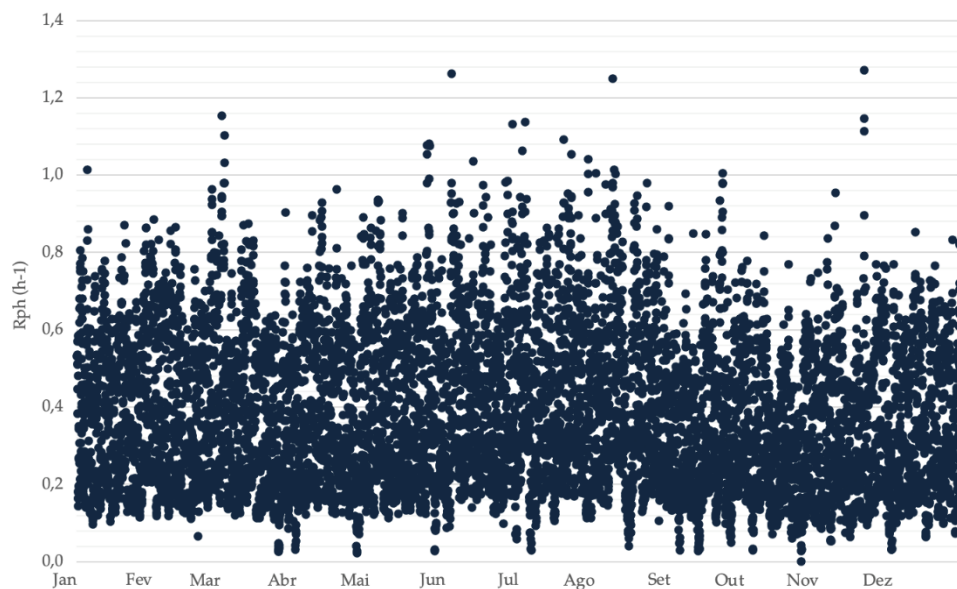


Figura 4.49 - Valores de Rph horários ao longo de um ano

Pela Figura 4.49 conclui-se, mais uma vez, que a ventilação noturna permite alcançar renovações horárias mais favoráveis sendo um fator benéfico para os ocupantes do edifício permitindo renovar o ar interior favorecendo melhores condições ambientais.

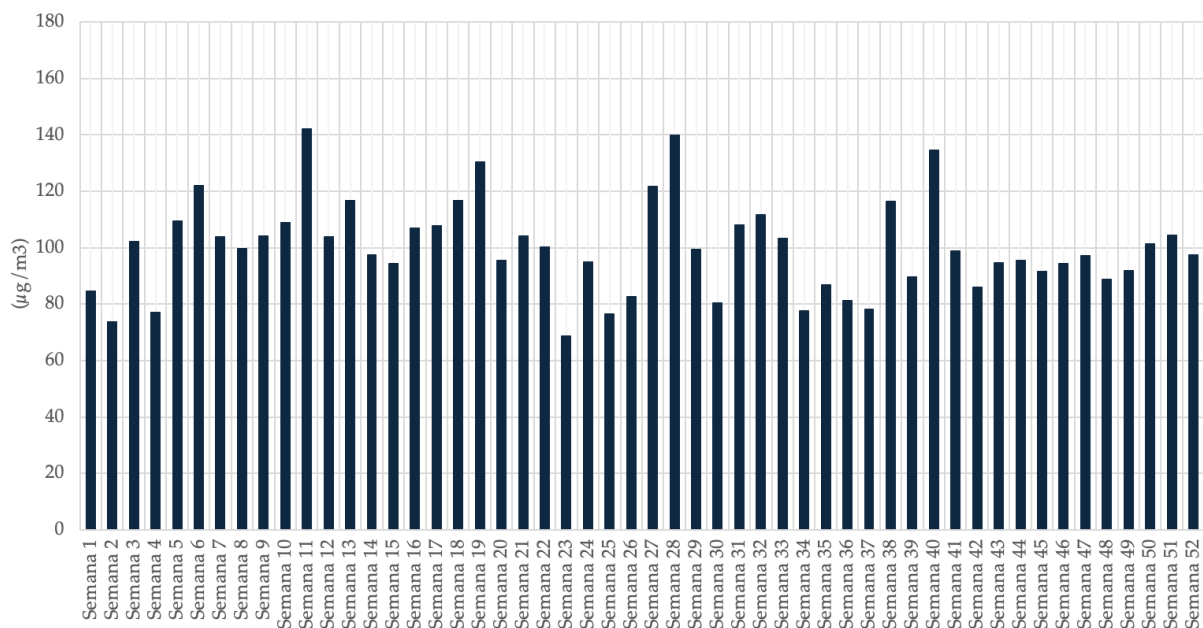


Figura 4.50 - Médias semanais da concentração de poluentes no interior do edifício ao longo de um ano

Da Figura 4.50 conclui-se que as semanas críticas são as mesmas que foram constatadas até à presente simulação. Observa-se um ligeiro acréscimo nas concentrações de poluentes em comparação com a simulação anterior (Sim_2.5.1). Especificamente, a Semana 11 ultrapassa $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no conjunto aglomerado de poluentes. Esta análise destaca, mais uma vez, a persistência de certos períodos críticos ao longo do ano, nos quais a concentração de poluentes atinge níveis mais elevados. O aumento observado em relação à simulação anterior indica que o aumento das taxas de renovação de ar não é simultâneo de uma menor concentração de poluentes exteriores no interior do edifício.

Tabela 4.31 - Concentração de poluentes no ambiente interior vs Índice da Qualidade do Ar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| | | Inverno | Primavera | Verão | Outono | Média Anual |
|-----------------|-------|---------|-----------|-------|--------|-------------|
| Sala 1 | NO2 | 30,2 | 41,6 | 44,9 | 47,2 | 31,5 |
| | PM2.5 | 8,0 | 8,3 | 10,6 | 5,1 | 6,5 |
| | PM10 | 12,0 | 18,2 | 23,0 | 19,8 | 18,6 |
| | SO2 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,6 | 0,5 |
| | O3 | 56,2 | 68,0 | 79,0 | 49,7 | 50,6 |
| Agregado | | 106,9 | 136,6 | 157,9 | 122,4 | 107,8 |
| Salão | NO2 | 30,5 | 41,4 | 45,0 | 47,3 | 31,6 |
| | PM2.5 | 11,2 | 8,5 | 10,8 | 5,1 | 6,5 |
| | PM10 | 8,2 | 18,6 | 23,4 | 20,1 | 19,0 |
| | SO2 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,6 | 0,6 |
| | O3 | 56,0 | 68,2 | 79,0 | 49,7 | 50,5 |
| Agregado | | 106,4 | 137,3 | 158,6 | 122,8 | 108,2 |
| Sala D | NO2 | 30,2 | 41,4 | 45,0 | 47,3 | 31,6 |
| | PM2.5 | 10,0 | 8,5 | 11,0 | 11,5 | 6,6 |
| | PM10 | 13,3 | 18,5 | 23,3 | 24,3 | 18,8 |
| | SO2 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,6 | 0,5 |
| | O3 | 83,0 | 68,2 | 81,2 | 49,7 | 50,6 |
| Agregado | | 137,0 | 137,1 | 160,9 | 133,4 | 108,0 |

A Tabela 4.31, que apresenta as concentrações de cada poluente no interior de cada compartimento em cada semana representativa de cada estação, confirma as conclusões previamente referidas. Observa-se um aumento das concentrações interiores com a utilização da presente estratégia de ventilação, o que impacta negativamente a saúde e conforto dos ocupantes, seguindo o “Índice da Qualidade do Ar” desenvolvido pela APA.

Analisando os valores das concentrações na perspectiva da preservação dos materiais presentes no interior do museu, os quais possuem uma elevada importância cultural, disponibiliza-se a Tabela 4.32. É possível visualizar uma quantidade significativa de valores acima do limite sugerido no ASHRAE HandBook 2015. Esta análise destaca os desafios enfrentados na manutenção da qualidade do ar interior dentro dos parâmetros ideais para a preservação de materiais históricos e culturais. As concentrações constatadas apesar de não representarem uma forte ameaça para os utilizadores, afetam gravemente a longevidade e integridade de objetos com elevada importância cultural.

Tabela 4.32 - Concentração de poluentes no ambiente interior vs ASHRAE 2015 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| | | Inverno | Primavera | Verão | Outono | Média Anual |
|--------|-----------------|---------|-----------|-------|--------|-------------|
| Sala 1 | NO2 | 30,2 | 41,6 | 44,9 | 47,2 | 31,5 |
| | PM2.5 | 8,0 | 8,3 | 10,6 | 5,1 | 6,5 |
| | PM10 | 12,0 | 18,2 | 23,0 | 19,8 | 18,6 |
| | SO2 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,6 | 0,5 |
| | O3 | 56,2 | 68,0 | 79,0 | 49,7 | 50,6 |
| | Agregado | 106,9 | 136,6 | 157,9 | 122,4 | 107,8 |
| Salão | NO2 | 30,5 | 41,4 | 45,0 | 47,3 | 31,6 |
| | PM2.5 | 11,2 | 8,5 | 10,8 | 5,1 | 6,5 |
| | PM10 | 8,2 | 18,6 | 23,4 | 20,1 | 19,0 |
| | SO2 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,6 | 0,6 |
| | O3 | 56,0 | 68,2 | 79,0 | 49,7 | 50,5 |
| | Agregado | 106,4 | 137,3 | 158,6 | 122,8 | 108,2 |
| Sala D | NO2 | 30,2 | 41,4 | 45,0 | 47,3 | 31,6 |
| | PM2.5 | 10,0 | 8,5 | 11,0 | 11,5 | 6,6 |
| | PM10 | 13,3 | 18,5 | 23,3 | 24,3 | 18,8 |
| | SO2 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,6 | 0,5 |
| | O3 | 83,0 | 68,2 | 81,2 | 49,7 | 50,6 |
| | Agregado | 137,0 | 137,1 | 160,9 | 133,4 | 108,0 |

4.3 Comparação de Resultados

O principal objetivo deste subcapítulo é realizar uma análise comparativa das simulações relativamente à concentração de poluentes no interior do edifício. Esta comparação permite uma compreensão aprofundada do impacto das diferentes estratégias e mecanismos de ventilação implementados. Como visto anteriormente, a ventilação natural desempenha um papel crucial na gestão da qualidade do ar interior, influenciando diretamente a saúde e

conforto dos utilizadores do edifício. A comparação das simulações não só esclarece a eficácia das estratégias de ventilação natural, como também oferece uma base sólida para futuras pesquisas e desenvolvimento de práticas no domínio da ventilação de edifícios.

A Figura 4.51 ilustra a média anual da concentração aglomerada dos cinco poluentes no interior do edifício em cada uma das simulações realizadas. É importante referir que a simulação Sim_2.4 não é incluída no presente gráfico, uma vez que não abrange uma avaliação anual. A análise dos dados apresentados na Figura 4.51 permite concluir que a Sim_2.2.1 é a que regista a menor concentração de poluentes no interior do edifício ao longo do ano; pese embora possa apresentar efeitos catastróficos para conservação, saúde e conforto. É importante destacar a Sim_2.5.1 que, como visto anteriormente, permite alcançar taxas de renovação horárias superiores e é a segunda simulação com menor concentração de poluentes no interior, permitindo uma boa combinação entre ventilação natural e manutenção das condições interiores no que diz respeito a poluentes exteriores.

Em contrapartida, as simulações Sim_2.2.2 e Sim_2.3.1 mostram-se significativamente mais prejudiciais, apresentando as maiores concentrações de poluentes. Estes resultados sugerem que as estratégias de ventilação utilizadas nestas simulações apresentam menor eficácia na mitigação da concentração de poluentes, impactando diretamente a qualidade do ar interior. Desta forma, a Figura 4.51, não só destaca as diferenças de desempenho entre as diversas estratégias de ventilação natural analisadas, como também sublinha a importância de uma seleção cuidada e criteriosa da estratégia a ser adotada de modo a alcançar melhorias significativas na QAI.

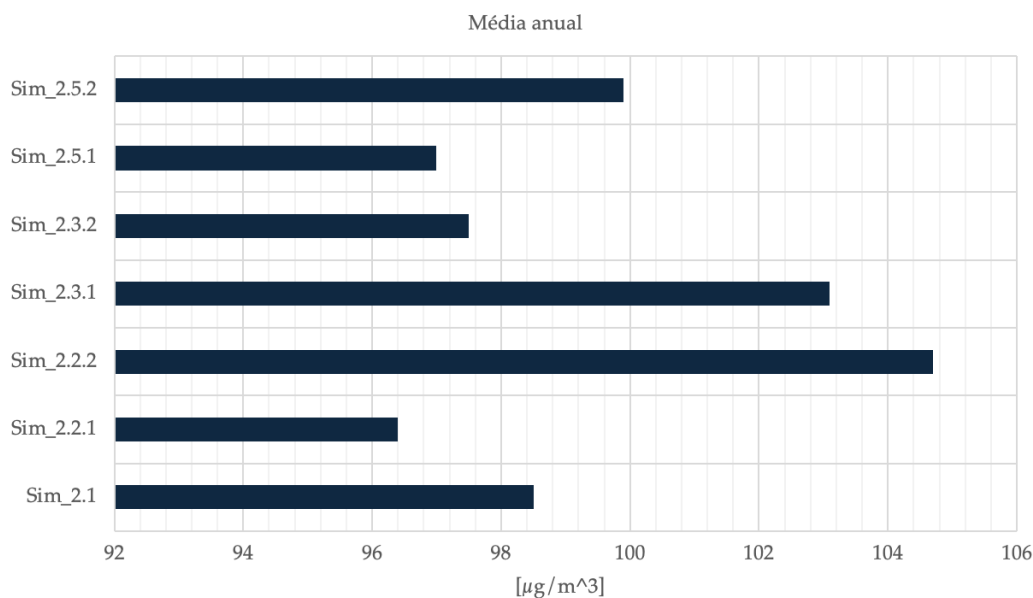


Figura 4.51 - Média anual da concentração aglomerada de poluentes no interior do edifício em cada simulação

Para uma análise mais pormenorizada, efetuaram-se os cálculos das médias mensais das concentrações agregadas de poluentes no interior do edifício. Através da Figura 4.52 e da

Tabela 4.33, pretende-se fornecer ao leitor uma visão detalhada da variação das concentrações de poluentes em função da implementação de diferentes estratégias ou mecanismos de ventilação natural, conforme retratado em cada simulação. Esta abordagem permite avaliar a eficácia de cada conjunto de condições na melhoria da qualidade do ar interior. Note-se que para além da importância do conhecimento da estratégia com melhor desempenho numa perspetiva anual (Figura 4.51), é importante perceber a variação mensal devido às diferenças climáticas sazonais exteriores. A análise comparativa de cada estratégia afetada pela alteração climática exterior é extremamente relevante. Adote-se, como exemplo, a estratégia de ventilação cruzada este/oeste (Sim_2.3.2), linha roxa: nos primeiros meses do ano, está entre as piores estratégias em termos de entrada de poluentes, mas a partir de junho até dezembro, é a simulação que insere menor quantidade de poluentes no interior do edifício.

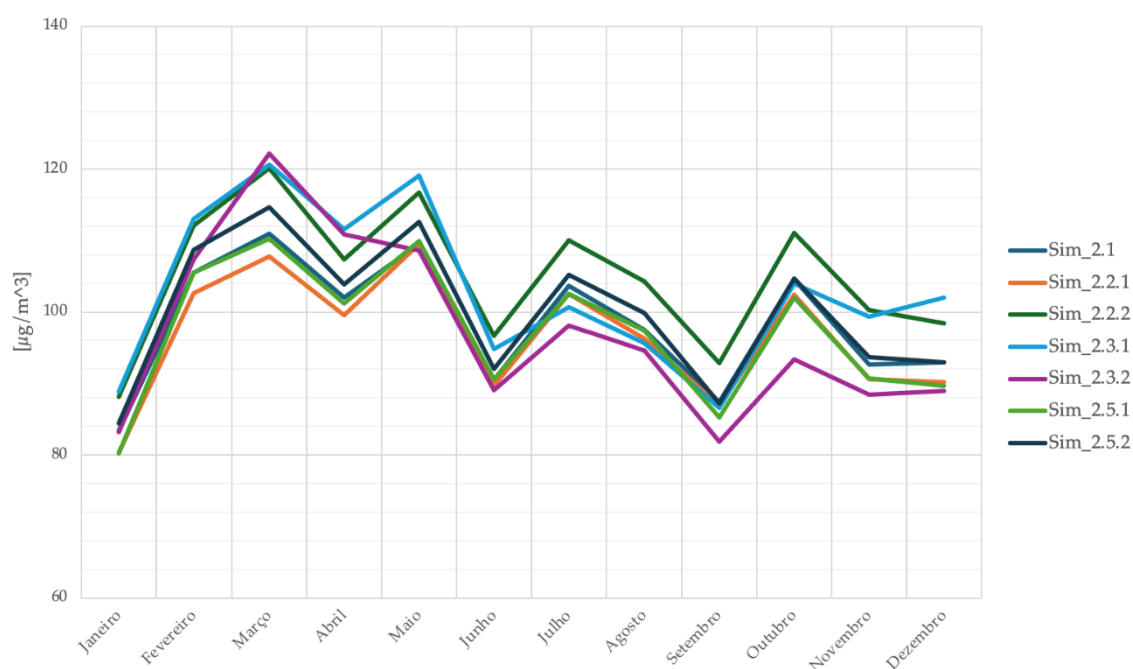


Figura 4.52 - Variação média mensal da concentração do aglomerado de poluentes no interior do edifício

Tabela 4.33 - Médias mensais do aglomerado de poluentes no interior do edifício por cada simulação ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| | Sim_2.1 | Sim_2.2.1 | Sim_2.2.2 | Sim_2.3.1 | Sim_2.3.2 | Sim_2.5.1 | Sim_2.5.2 |
|------------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Janeiro | 83,4 | 80,3 | 88,2 | 88,9 | 83,2 | 80,2 | 84,4 |
| Fevereiro | 105,5 | 102,7 | 112,1 | 113,0 | 107,3 | 105,5 | 108,7 |
| Março | 111,0 | 107,8 | 120,1 | 120,6 | 122,2 | 110,3 | 114,7 |
| Abril | 102,0 | 99,6 | 107,3 | 111,6 | 110,9 | 101,2 | 103,9 |
| Maio | 109,5 | 109,5 | 116,7 | 119,0 | 108,6 | 109,9 | 112,6 |
| Junho | 90,5 | 89,6 | 96,7 | 94,9 | 89,0 | 90,6 | 92,0 |
| Julho | 103,7 | 102,6 | 110,0 | 100,7 | 98,1 | 102,5 | 105,2 |
| Agosto | 97,5 | 96,3 | 104,3 | 95,6 | 94,6 | 97,4 | 99,9 |
| Setembro | 87,4 | 86,9 | 92,8 | 86,6 | 81,9 | 85,2 | 87,2 |
| Outubro | 104,6 | 102,5 | 111,0 | 104,0 | 93,4 | 102,0 | 104,7 |
| Novembro | 92,7 | 90,6 | 100,3 | 99,3 | 88,4 | 90,7 | 93,7 |
| Dezembro | 93,0 | 90,2 | 98,4 | 102,0 | 89,0 | 89,7 | 93,0 |

A principal conclusão que deve ser destacada é que a simulação que apresenta a menor concentração de poluentes no interior do edifício varia ao longo do ano. No início do ano, de janeiro até meados de maio, a simulação Sim_2.2.1, que adota uma estratégia de ventilação unilateral com recurso a uma única abertura, demonstra as menores médias mensais de concentração de poluentes. No entanto, a partir de meados de junho, a simulação Sim_2.3.2 referente a uma estratégia de ventilação cruzada, assume destaque, apresentando médias inferiores quando comparadas com as restantes simulações exibidas. A simulação com recurso a ventilação noturna (Sim_2.5.1) é a estratégia que apresenta os valores mais constantes ao longo do ano, sendo, portanto, um fator benéfico desta estratégia.

Estes resultados evidenciam a importância de considerar a variação sazonal na escolha das estratégias de ventilação mais eficazes para manutenção da qualidade do ar interior.

A análise pormenorizada das diferentes simulações permite identificar a eficácia relativa de cada abordagem ao longo do ano, destacando a necessidade de uma gestão adaptativa. De seguida, é objetivo apresentar uma análise singular de cada poluente recorrendo à semana definida como representativa de cada estação do ano. Selecionaram-se dois compartimentos representativos (Sala D e Salão), já utilizados para apresentação de resultados anteriormente, para que seja possível comparar o impacto das diferentes estratégias de ventilação em diferentes localizações do edifício.

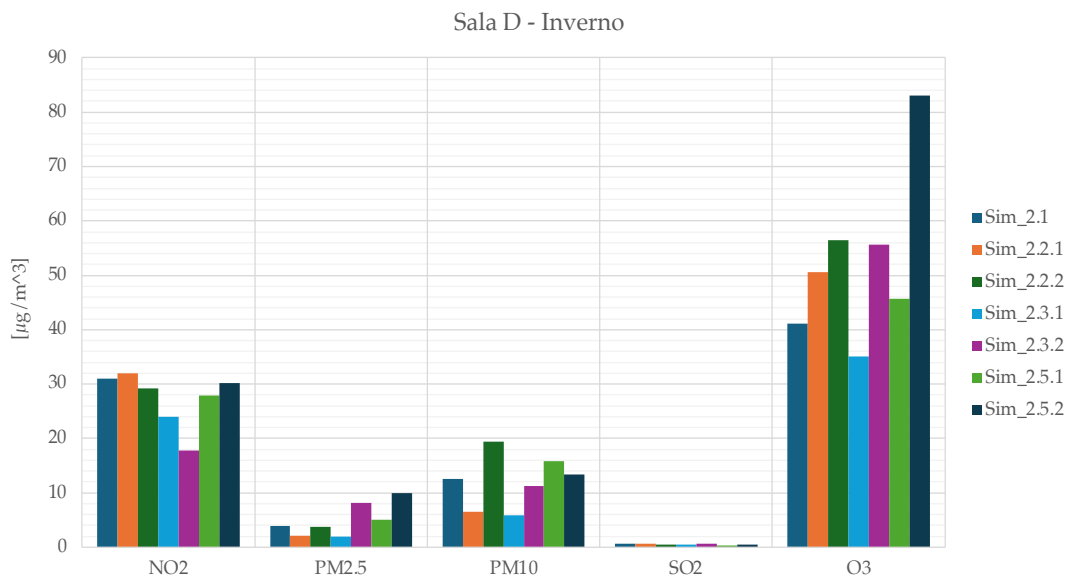


Figura 4.53 - Concentração de poluentes no interior da Sala D durante o inverno por simulação

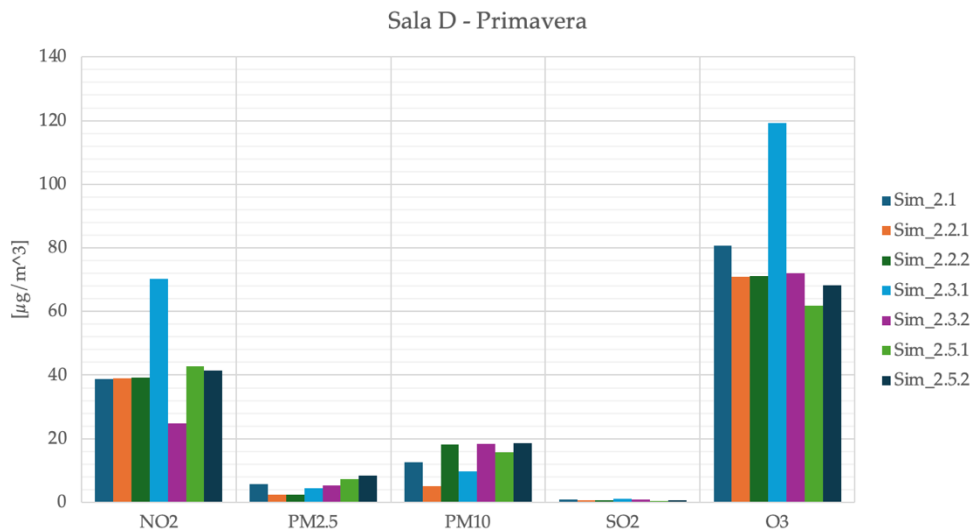


Figura 4.54 - Concentração de poluentes no interior da Sala D durante a primavera por simulação

Analisando as Figuras 4.53 e 4.54, percebe-se que a eficácia de cada estratégia de ventilação natural varia significativamente não apenas com a estação do ano mas também com o tipo de poluente. Durante o inverno, é evidente que três simulações, Sim_2.2.2, Sim_2.3.2 e Sim_2.5.2, apresentam desempenhos negativos para o poluente O₃. Por outro lado, durante a primavera, a Sim_2.3.1 é a que mais contribui para as elevadas concentrações deste poluente no interior do edifício.

A presente análise demonstra a complexidade da gestão da qualidade do ar interior e a necessidade de selecionar estratégias de ventilação adaptativas. Independentemente da estratégia de ventilação natural a admissão de ar deve processar-se por grelhas dotadas de filtros adequados aos tipos de poluentes.

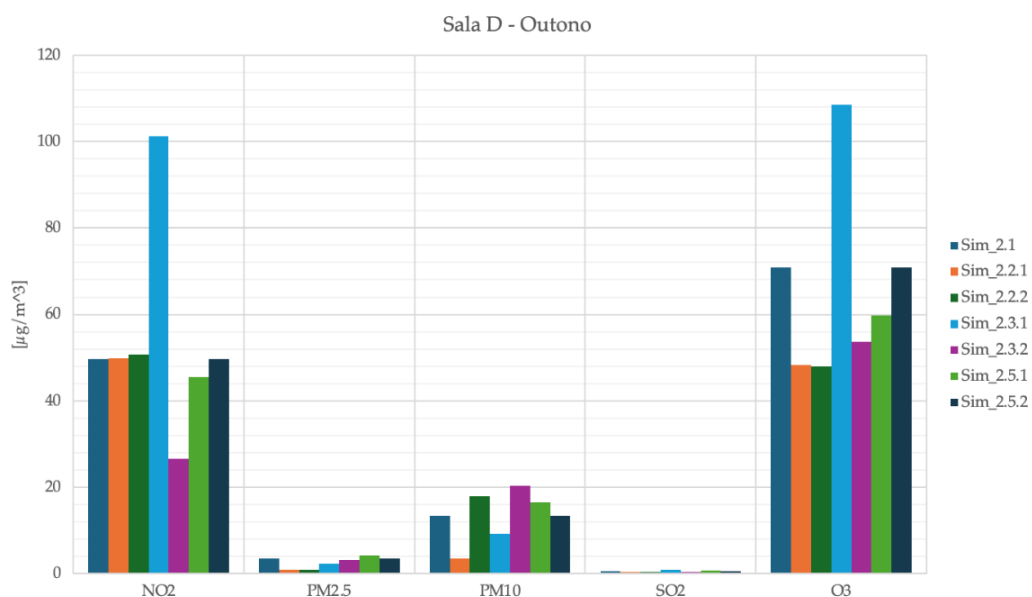


Figura 4.55 - Concentração de poluentes no interior da Sala D durante o outono por simulação

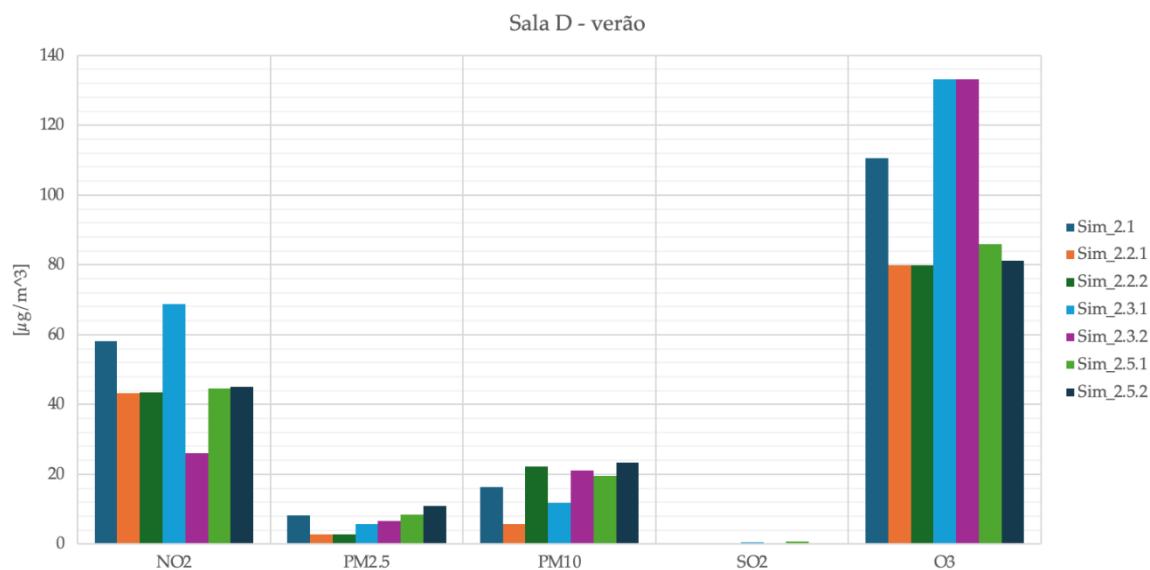


Figura 4.56 - Concentração de poluentes no interior da Sala D durante o verão por simulação

A Figura 4.56 sugere que, durante o período do outono, a estratégia de ventilação natural retratada na Sim_2.3.1 tem um impacto fortemente negativo para a qualidade do ar interior, especialmente no que se refere aos poluentes NO₂ e O₃. Como visto anteriormente, concentrações elevadas de NO₂ e O₃ aceleram a degradação de materiais de construção e artefactos devido à corrosão e deterioração química. O NO₂ contribui significativamente para degradação de pedras calcárias formando compostos ácidos nas superfícies. Já o ozono reage com compostos orgânicos deteriorando superfícies como pinturas e tecidos causando a perda de integridade estrutural [113, 114]. De seguida, apresentam-se os gráficos (figuras 4.57 e 4.58) relativos à comparação efetuada no compartimento Salão. A análise entre compartimentos permite concluir se existe variabilidade entre cada estratégia de ventilação e a disposição espacial do compartimento no interior do edifício. Através da análise da Figura 4.57, em comparação com a Figura 4.53, é possível retirar conclusões sobre esta variabilidade. A Figura 4.57 sugere um aumento considerável de PM₁₀ no interior do edifício para a Sim_2.2.2, em relação ao observado na Figura 4.53. Por outro lado, no que se refere ao poluente ozono, a Sim_2.1 apresenta uma redução significativa na sua contribuição para a permanência deste poluente no ambiente interior.

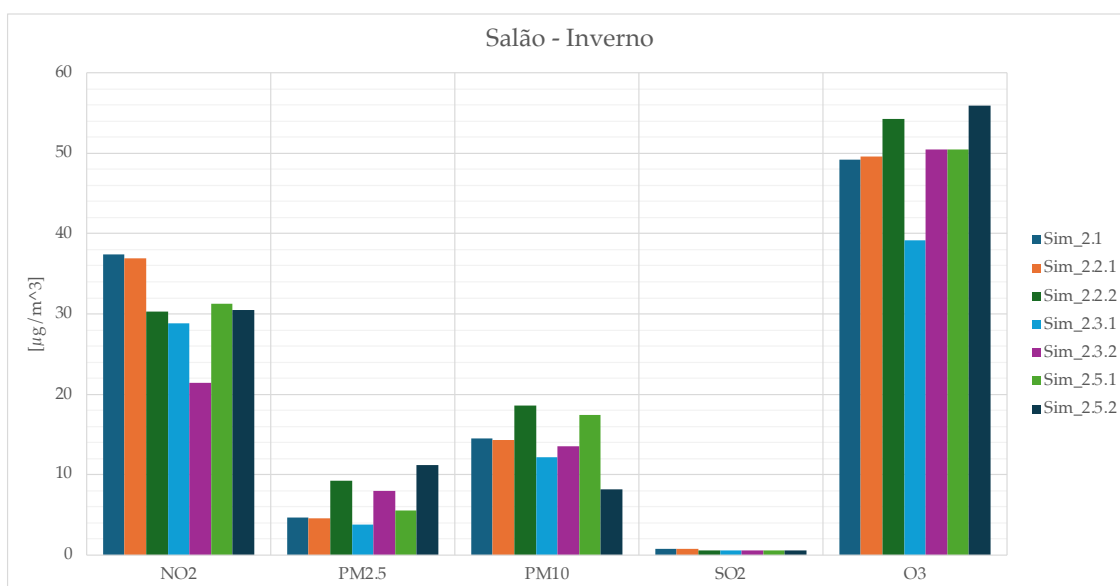


Figura 4.57 - Concentração de poluentes no interior do Salão durante o inverno

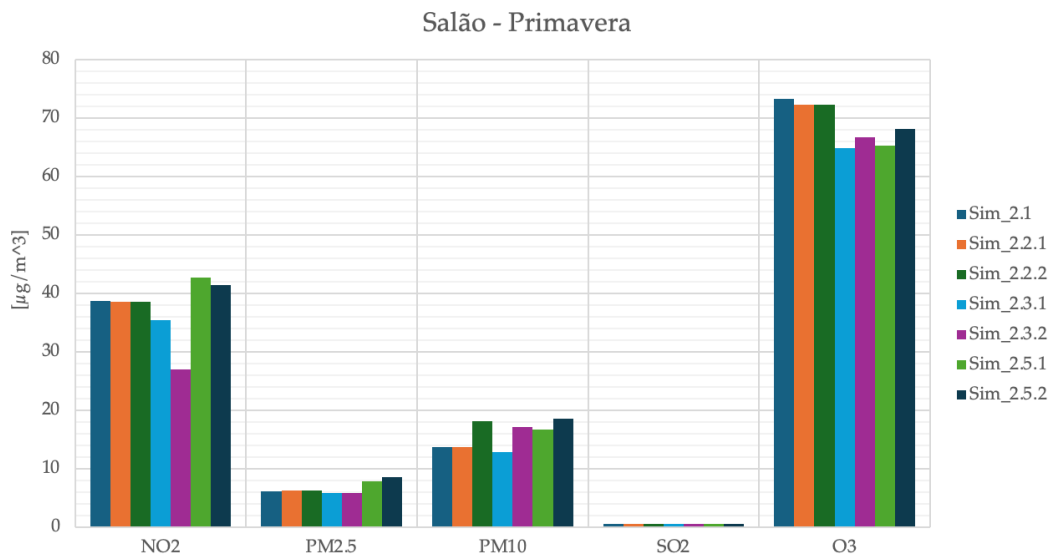


Figura 4.58 - Concentração de poluentes no interior do Salão durante a primavera

Na Figura 4.58, observa-se que as concentrações de NO₂ variam relativamente pouco entre as simulações, com a Sim_2.3.2 a apresentar o menor valor de concentração e a Sim_2.5.1 o maior. Esta diferença sugere que a estratégia adotada em Sim_2.5.1 é a menos eficaz na redução de NO₂, enquanto a estratégia Sim_2.3.2 é a mais eficiente. Para o PM_{2.5}, as concentrações são relativamente baixas e apresentam pouca variabilidade entre as diferentes

simulações. Contudo, a Sim_2.5.1 regista uma ligeira subida em comparação com as restantes, o que indica menor eficácia na remoção deste tipo de partículas. As concentrações de O₃ substancialmente mais elevadas em todas as simulações, com a Sim_2.1 a apresentar a maior concentração. Este dado sugere que nenhuma das estratégias de ventilação testadas é particularmente eficaz na redução dos níveis de ozono no interior durante o período em análise.

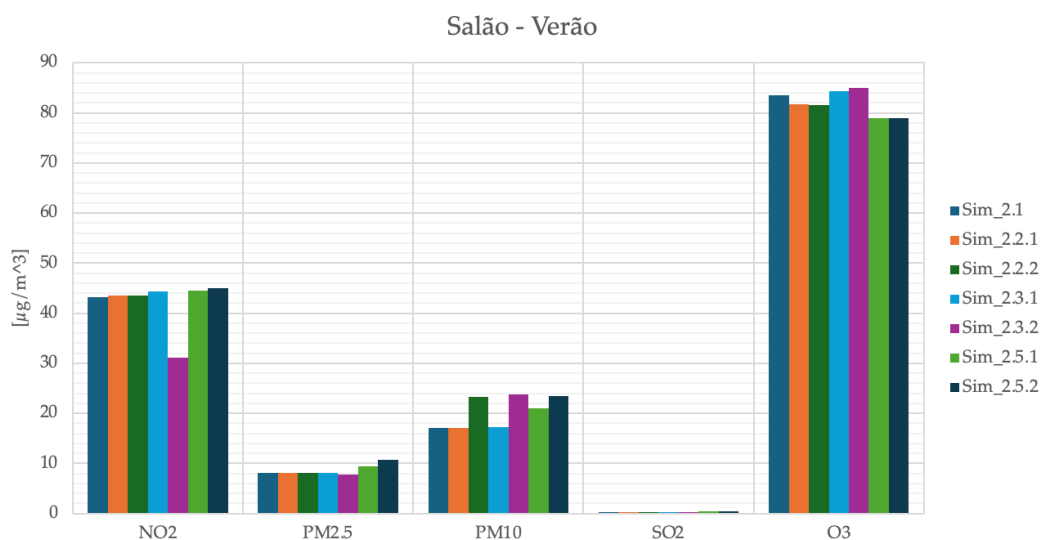


Figura 4.59 - Concentração de poluentes no interior do Salão durante o verão

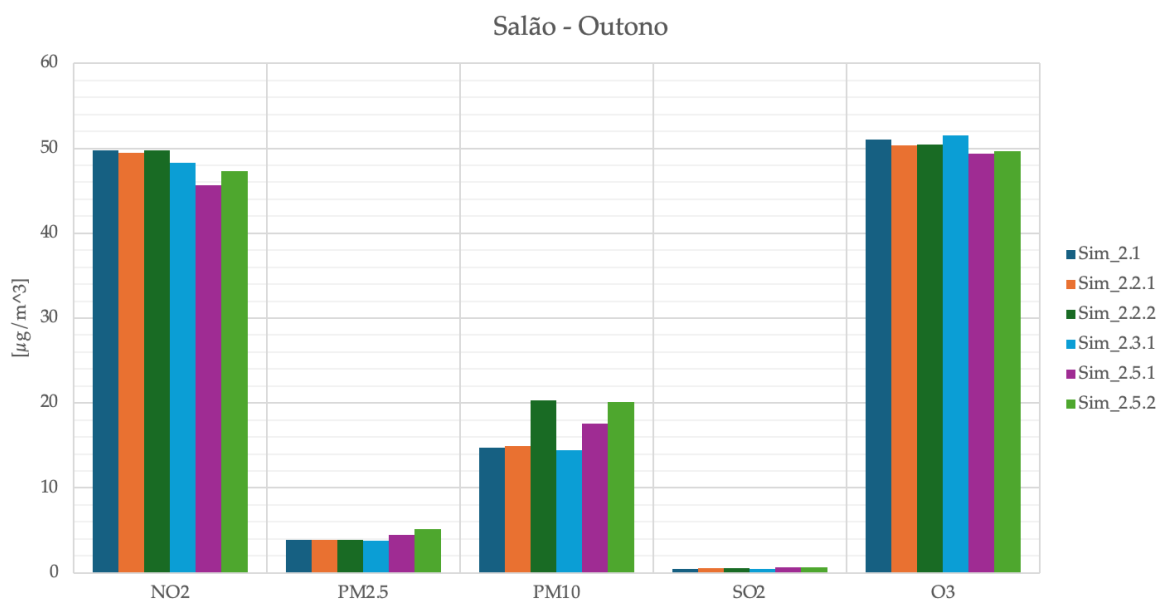


Figura 4.60 - Concentração de poluentes no interior do Salão durante o outono

Conclusões e trabalhos futuros

Neste Capítulo são expostas as principais conclusões a retirar do impacto que os poluentes exteriores têm na qualidade do ar interior em centros urbanos numa ótica de saúde dos ocupantes e do recheio material dos edifícios. O capítulo refere ainda a contribuição para a comunidade científica, bem como algumas recomendações para trabalhos de investigação a serem realizados no futuro.

5.1 Conclusões gerais

Analisar os mecanismos de ventilação natural de qualquer edifício envolve um estudo com um grau considerável de incerteza. Este facto decorre da necessidade de utilizar variáveis como a velocidade e direção do vento, que se baseiam em dados históricos para prever comportamentos futuros, um processo intrinsecamente variável.

O presente documento teve como objetivo principal investigar e analisar o comportamento de diversas estratégias de ventilação natural quando aplicadas a um edifício, simultaneamente procurou-se compreender o impacto da concentração de poluentes exteriores na qualidade do ar interior sob o efeito das diferentes estratégias de ventilação natural estudadas ao longo do documento. Para a sua realização recorreu-se a simulações de Dinâmica de Fluidos Computacional avaliando o potencial da ventilação natural em edifícios localizados em ambientes densos e poluídos. O trabalho realizado demonstra que a adoção de diferentes estratégias de ventilação natural apresenta impactos distintos na qualidade do ambiente interior dos edifícios localizados em centros urbanos numa perspetiva tanto dos ocupantes como de preservação de artefactos.

No que diz respeito às taxas de renovação horária, não foram atingidas condições favoráveis comparativamente com a norma EN 15251; nenhuma das estratégias analisadas conseguiu cumprir os critérios da Categoria I (Elevado grau de expectativa) e apenas marginalmente os da Categoria II (Grau normal de expectativa), ficando aquém dos requisitos mínimos necessários. A maioria dos valores enquadra-se nas Categorias III e IV, o que evidencia que não é razoável adotar exclusivamente uma estratégia de ventilação natural no edifício em estudo. Devem ser adotadas medidas corretivas no edifício nomeadamente a utilização de

ventilação mecânica por forma a assegurar condições favoráveis de conservação, saúde e conforto no interior do edifício.

Por outro lado, conclui-se que o ambiente interior segue a tendência do ar exterior a que está exposto no que diz respeito à introdução de agentes poluentes exteriores. No entanto, existem variações dependendo do tipo de estratégia de ventilação natural que seja implementada. A Sim_2.2.1 apresenta a menor média anual de concentração de poluentes no interior do edifício ($96,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$); por outro lado as simulações Sim_2.2.2 e Sim_2.3.1 apresentam as médias anuais mais elevadas de concentração de poluentes no ambiente interior do edifício, $104,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $103,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respetivamente.

Os poluentes atmosféricos exteriores, NO_2 , PM_{10} e O_3 mostram-se os mais impactantes na QAI, sendo que apenas o NO_2 e o O_3 apresentaram um grau “Médio” de concentração interior no que diz respeito ao “Índice de Qualidade do Ar” da APA. É importante referir que o ozono nunca apresenta concentrações médias abaixo de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no decorrer de qualquer estação. Já o NO_2 apresenta uma concentração média superior a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em todas as estações do ano. Adicionalmente, o estudo aponta para a importância de considerar as variações sazonais na implementação de estratégias de ventilação natural (ver Figura 4.52), uma vez que diferentes estações do ano reproduzem distintas condições atmosféricas impactando de formas diferentes a introdução de poluentes atmosféricos exteriores no ambiente interior.

O presente estudo apresenta contribuições relevantes para a comunidade científica, que podem ser divididas em dois grupos. Por um lado, a literatura disponível dedicada à análise da contribuição de poluentes exteriores na qualidade do ar interior é pouco abundante. Compreender o impacto dos agentes poluentes em centros urbanos é uma matéria de extrema relevância. É necessário estudar aprofundadamente esta temática para que seja possível adotar medidas de mitigação, não só para redução das emissões poluentes mas também para preparação dos edifícios para combater este problema, nomeadamente a utilização de grelhas com filtros. Deve ser uma prioridade o estudo de novas abordagens adaptativas e personalizadas na gestão de museus e outros edifícios localizados em centros urbanos onde a concentração de poluentes exteriores é elevada. Por outro lado, foram acrescentados tópicos importantes à literatura existente sobre a problemática da QAI, adicionando diferentes pontos de estudo e análise.

5.2 Propostas de trabalhos futuros

De seguida, apresentam algumas propostas que se consideram relevantes para a execução de trabalhos de investigação futuros:

- Menores Rph admitem menor quantidade de poluentes exteriores. Resta saber se compensa não renovar o ar e aumentar a concentração de poluentes gerados no interior ou proporcionar mais elevadas Rph e aumentar a concentração de

poluentes provenientes do interior. Será necessário realizar a introdução da contribuição de poluentes interiores (vapor de água, CO₂, VOCs, entre outros) no estudo, com vista a proceder à combinação entre o impacto dos poluentes interiores e exteriores por forma a compreender a sua interação.

- A introdução da componente energética será também interessante, sabendo que proporcionar maiores Rph eleva a necessidade de energia para climatizar. Contabilizar esta variável será muito relevante, nomeadamente em matéria de transição energética.

Referências Bibliográficas

- [1] OCDE, «OECD Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction», 2012.
- [2] J. Sundell, «On the history of indoor air quality and health», *Indoor Air*, 2004, doi: 10.1111/j.1600-0668.2004.00273.x.
- [3] ASHRAE, *ASHRAE Handbook—Fundamentals*, SI Edition. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 2009.
- [4] Y. Zhang, *Indoor Air Quality Engineering*. CRC press, 2004.
- [5] J. Tidblad, V. Kucera, e R. Hamilton, *The Effects of Air Pollution on Cultural Heritage*, vol. 6. New York: Springer, 2009.
- [6] K. E. Paleologos, M. Y. E. Selim, e A. M. O. Mohamed, «Indoor air quality: pollutants, health effects, and regulations», *Pollution Assessment for Sustainable Practices in Applied Sciences and Engineering*, pp. 405–489, 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-809582-9.00008-6.
- [7] A. P. Jones, «Indoor air quality and health», *Atmos Environ*, vol. 33, n. 28, pp. 4535–4564, Dez. 1999, doi: 10.1016/S1352-2310(99)00272-1.
- [8] A. Cincinelli e T. Martellini, «Indoor Air Quality and Health», *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2017, Vol. 14, Page 1286, vol. 14, n. 11, p. 1286, Out. 2017, doi: 10.3390/IJERPH14111286.
- [9] H. E. Silva e F. M. A. Henriques, «The Impact of Tourism on the Conservation and IAQ of Cultural Heritage: The Case of the Monastery of Jerónimos (Portugal)», *Build Environment*, vol. 190, 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107536.
- [10] CEN, «Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics. EN Standard 15251», Brussels, 2007.
- [11] J. D. Spengler, J. M. Samet, e J. F. McCarthy, *Indoor Air Quality Handbook*. New York, NY: McGRAW-HILL Book Co, 2000.
- [12] NIOSH, Indoor Air Quality Guidance and Reference Manual 1998 at State of Knowledge Report: Air Toxics and Indoor Air Quality in Australia. *Environmental Australia*, 2001.
- [13] S. Coentro, «Qualidade do Ar Interior em Habitações: Fontes Emissoras de Poluentes», Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, NOVA FCT, 2015.
- [14] B. Berg-Munch et al., «Ventilation Requirements for the Control of Body Odor in Spaces Occupied by Women», vol. 12, n. 1–4, 1986. doi: 10.1016/0160-4120(86)90030-9
- [15] S. C. William et al, «Ventilation Requirements in Buildings—I. Control of Occupancy Odor and Tobacco Smoke Odor», vol. 17, n. 6, pp. 1183–1197, 1967. doi: 10.1016/0004-6981(83)90341-4
- [16] ASHRAE, «Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality», *ASHRAE*, 2013. Disponível em: www.ashrae.org/technology.

- [17] CEN, «Energy Performance of Buildings - Ventilation for Buildings - Part 1: Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics - Module M1-6. », Brussels, 2019.
- [18] P. O. Fanger, «Introduction of the Olf and the Decipol Units to Quantify Air Pollution Perceived by Humans Indoors and Outdoors», *Energy Building*, vol. 12, n. 1, pp. 1–6, 1988.
- [19] LHEA, «What People Think About Air Pollution, their Health in General, and Asthma in Particular», London, 1997.
- [20] L. Melymuk, H. Demirtepe, e S. R. Jílková, «Indoor Dust and Associated Chemical Exposures», *Curr Opin Environment Science and Health*, vol. 15, pp. 1–6, Jun. 2020, doi: 10.1016/J.COESH.2020.01.005.
- [21] D. Krewski *et al.*, «Overview of the Reanalysis of the Harvard Six Cities Study and American Cancer Society Study of Particulate Air Pollution and Mortality», *J Toxicol Environment and Health*, vol. 66, pp. 1507–1552, Ago. 2003, doi: 10.1080/15287390306424.
- [22] A. Lai, K. W. Mui, L. T. Wong, e L. Y. Law, «An evaluation model for indoor environmental quality (IEQ) acceptance in residential buildings», *Energy Buildings*, 2009, doi: [10.1016/j.enbuild.2009.03.016](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.03.016)
- [23] European Federation of Allergy and Airways Diseases, «Indoor Air Quality and its Effects on Health: a presentation of the guidelines for health-based ventilation in Europe», Brussels, 2013.
- [24] M. Jantunen, E. O. Fernandes, P. Carrer, e S. Kephelopoulos, «Promoting Actions for Healthy Indoor Air», Luxembourg, 2011.
- [25] A. H. Al-Zaidi, M. M. Mahmoud, e T. G. Karayiannis, «Condensation flow patterns and heat transfer in horizontal microchannels», *Exp Therm Fluid Sci*, vol. 90, pp. 153–173, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.EXPTHERMFLUSCI.2017.09.009.
- [26] C. R. De Freitas e A. Schmekal, «Condensation as a Microclimate Process: Measurement, Numerical Simulation and Prediction in the Glowworm Cave, New Zealand», *International Journal of Climatology*, vol. 23, pp. 557–575, 2003, doi: 10.1002/joc.898.
- [27] C. K. Nguyen, C. Teodosiu, F. Kuznik, D. David, R. Teodosiu, e G. Rusaouën, «A full-scale experimental study concerning the moisture condensation on building glazing surface», *Building Environment*, vol. 156, pp. 215–224, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.BUILD-ENV.2019.04.024.
- [28] World Health Organization, «WHO Guidelines for Indoor Air Quality: selected pollutants», 2010.
- [29] European Environment Agency, «Environment and Human Health», Luxembourg, 2015.
- [30] «Lei n.º 19/2014. Diário da República, 1ª série - N.º 73 - 14 Abril de 2014».
- [31] World Health Organization Regional Office for Europe, «WHO guidelines for indoor air quality:dampness and mould», *World Health Organization*, p. 228, 2009, Consultado em: 22 de Maio de 2024. Disponível em: https://books.google.com/books/about/WHO_Guidelines_for_Indoor_Air_Quality.html?hl=es&id=PxB8UUHihWgC
- [32] World Health Organization, «WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants; Chapter 5. Nitrogen dioxide», *World Health Organization. Regional Office for Europe*, pp. 201–248, 2010, Acedido: 22 de Maio de 2024. Disponível em: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535.pdf

- [33] World Health Organization, «WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide». 2021.
- [34] R. Kozłowski, «Climate-induced Damage of Wood: Numerical Modeling and Direct Tracing», Tenerife, 2007.
- [35] E. Erhardt e M. F. Mecklenburg, «Relative Humidity Re-examined», London, 1994.
- [36] M. Mecklenburg, C. Tumosa, e E. Erhardt, «Structural Response of Painted Wood Surfaces to Changes in Ambient Relative Humidity», in *Painted Wood: History and Conservation*, edited by Dorge, V. and Howlett, F. C., 464–483, 1998, Los Angeles, CA: The Getty Conservation Institute.
- [37] J. Martens, «Climate Risk Assessment in Museums: Degradation Risks Determined from Temperature and Relative Humidity Data. », Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2012, doi: 10.6100/IR729797.
- [38] E. Erhardt e M. F. Mecklenburg, «Relative Humidity Re-examined», *Preventive Conservation Practice Theory and Research*, pp. 32–38, 1994.
- [39] X. Zou et al, «Prediction of Paper Permanence by Accelerated Aged II. Comparison of the Aging Process», 1996.
- [40] K. Sedlbauer, «Prediction of Mould Fungus Formation on the Surface of and Inside Building Components», Dissertation, Universität Stuttgart, 2001.
- [41] S. Michalski, «Relative Humidity: a discussion of correct/incorrect values», *ICOM Committee of Conservation*, vol. II, 624-629, 1993.
- [42] G. Scott, «Moisture, Ventilation and Mould Growth », em *Preventive Conservation Practice, Theory and Research*, The International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, 1994, pp. 149–153.
- [43] ASHRAE, «Museums, Libraries and Archives », 2007.
- [44] W. Cai, Z. Wu, e H. Wang, «Effect of Ventilation and Air Conditioning System on Indoor Air Quality of Low-carbon Buildings », *International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE)*, 2011, doi: 10.1109/ICETCE.2011.5775823.
- [45] L. Qinghai, Z. Jun, e Y. Xiufei, «Measurement of Cooling Effect of Building Environment Greening», *J Environ Prot (Irvine, Calif)*, vol. 03, n. 07, pp. 569–572, 2012, doi: 10.4236/JEP.2012.37068.
- [46] F. M. A. Henriques, *Comportamento Higrotérmico de Edifícios*. 2011. ISBN: 978-989-20-3993-0
- [47] BSI (British Standards Institute), «Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics», London, UK, 2007.
- [48] Hagentoft, *Introduction to Building Physics*, 1st edition. Lund: Studentlitteratur, 2003.
- [49] CIBSE, *CIBSE Guide A: Environmental design uk*. London: Chartered Institution of Building Services Engineers, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b978-0-240->
- [50] F. Allard, *Natural Ventilation in Buildings*. London: James & James, 1998.
- [51] B. B. H. Montazeri, «CFD Simulation of Wind-Induced Pressure Coefficients on Buildings With and Without Balconies: Validation and Sensitivity Analysis», *Build Environ*, vol. 60, pp. 137–149, Fev. 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.11.012.
- [52] LNEC, «Eurocodigo 1: Acções em estruturas - Acções gerais - Part 1-4: Acções do vento», 2015. Disponível em: <https://doi.org/NP EN 1991-1-4>
- [53] M. V. Swami e S. Chandra, «Procedures for Calculating Natural Ventilation Airflow Rates in Buildings», Florida Solar Energy Center, Final report, FSEC-CR-163-86,1987.

- [54] D. Cóstola, B. Blocken, e J. Hensen, «Overview of Pressure Coefficient Data in Building Energy Simulation and Airflow Network Programs», *Build Environ*, vol. 44, n. 10, pp. 2027–2036, 2009, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2009.02.006.
- [55] BSI 5925, «Ventilation Principles and Designing for Natural Ventilation », 1995.
- [56] C. Walker, «Methodology for the Evaluation of Natural Ventilation in Buildings Using a Reduced-Scale Air Model», Massachusetts Institute of Technology, MIT, 2005.
- [57] H. Zhang et al., «A Critical Review of Combined Natural Ventilation Techniques in Sustainable Buildings», 1 de Maio de 2021, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2021.110795.
- [58] G. Gan, «Effective Depth of Fresh Air Distribution in Rooms with Single-sided Natural Ventilation», 2000. Disponível em: www.elsevier.com/locate/build
- [59] M. W. Liddament, «AIVC Guide to Energy Efficient Ventilation », *Coventry, GB*, 1996.
- [60] A. Schieweck e T. Salthammer, Emissions from Construction and Decoration Materials for Museum Showcases. 2009.
- [61] J. Tétreault e et al, Corrosion of Cooper and Lead by Formaldehyde, Formic and Acetic Acid Vapours. *Studies in Conservation* 48(4):237-250, 2003, doi: 10.1179/sic.2003.48.4.237.
- [62] S. M. P. Mesquita, «Modelação da Distribuição Espacial da Qualidade do Ar em Lisboa Usando Sistemas de Informação Geográfica», M. S. Thesis, ISEGI, UNL, 2009.
- [63] T. R. Oke, «Boundary Layer Climates», 1992.
- [64] K. D. Pissimanis, S. Karras, e V. A. Notaridou, «On the meteorological conditions during some strong smoke episodes in Athens», *Atmospheric Environment*, 1991.
- [65] R. B. Ribas, «Dispersão de poluentes na atmosfera», Lisboa, 1979.
- [66] T. Boningari e P. G. Smirniotis, «Impact of nitrogen oxides on the environment and human health: Mn-based materials for the NO_x abatement», *Current Opinion Chemical Engineering*, pp. 133–141, 2016.
- [67] L. T. Silva e J. F. G. Mendes, «Determinação do Índice de Qualidade do Ar numa Cidade de Média Dimensão», *Engenharia Civil*, n. 27, pp. 63-74, 2006.
- [69] F. Ferreira et al., «Avaliação Preliminar da Qualidade do Ar em Portugal – SO₂, NO₂, NO_x, PM₁₀ E Pb», Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território/Instituto do Ambiente, Julho, 2002.
- [70] L. Nogueira e S. Mesquita, «Avaliação da Qualidade do Ar na Região de Lisboa e Vale do Tejo em 2022», 2023.
- [71] Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, «Decreto-Lei n.º 102/2010», 2010.
- [72] M. D. Moran e R. V. Portelli, «Sources of Air Pollution », *Atmospheric Pollution*, pp. 117–127, 1987.
- [73] D. Ferreira, «L'atmosphère Terrestre en évolution, incidences et conséquences», Lisboa, 1991.
- [74] Agência Portuguesa do Ambiente (APA), «QualAr». Disponível em: <https://apambiente.pt/ar-e-ruído/indices-de-qualidade-do-ar>
- [75] A. Richard, «Acid Rain Attack on Outdoor Sculpture in Perspective», *Atmos Environ*, 146: 332-345, 2016, doi: 10.1016/j.atmosenv.2016.08.029.
- [76] H. R. Anderson, «Health Effects of Air Pollution Episodes, in: Holgate ST, Samet JM, Koren HS and Maynard RL», *Air Pollution and health*, 1999.
- [77] G. Thomson, *The Museum Environment*, Second. Butterworth-Heinemann, 1986.
- [78] R. A. Cox e S. A. Penkett, «Photo-oxidation of atmospheric SO₂», *Nature*, pp. 486–488, 1971.

- [79] V. Ramanathan e Y. Yeng, «Air Pollution, Greenhouse Gases and Climate Change: Global and Regional Perspectives», *Atmos Environment* 43, pp. 37–50, 2009.
- [80] P. Crutzen, «Atmospheric Chemistry in the “Anthropocene», *Challenges of a Changing Earth*, pp. 45–48, 2012.
- [81] S. J. Smith, H. Pitcher, e T. Wigley, «Global and Regional Anthropogenic Sulfur Dioxide Emissions », *Global Planet Change*, 2001.
- [82] M. Pippmann, Health Effects of Tropospheric Ozone. *Environmental Science & Technology*, 1991.
- [83] G. Scott, «Atmospheric Oxidation and Antioxidants », *Elsevier*, 1965.
- [84] T. Graedel, J. Franley, e G. Kammlott, «Ozone and Photon-enhanced Sulfidation of Copper», *Science*, 1984.
- [85] P. Durbin e T. A. Hecht, «The photochemistry of smog formation », *Clean Air*, pp. 8–16, 1975.
- [86] E. Briner, «Accelerating action of ozone in the autoxidation process», *Advances in Chemistry Series. American Chemical Society*, pp. 184–194, 1959.
- [87] G. R. Derwent, «Ozone measurement in an art gallery », Warren Spring Laboratory LR428 (AP), 1973.
- [88] T. D. Davies, B. Ramer, e A. C. Delany, «Indoor/outdoor ozone concentration at a contemporary art gallery».
- [89] EEA, «Air Quality in Europe - 2014 Report», EEA Report No 5/2014. 2014, ISSN 1725-9177.
- [90] BSI, «Methods for the Measurement of Air Pollution, Part 2, Determination of the Concentration of Suspended Matter», 1969.
- [91] J. Madureira, I. Paciência, J. Rufo, E. Ramos, H. Barros, e J. Teixeira, Indoor Air Quality in Schools and its Relationship with Children’s Respiratory Symptoms. *Atmospheric Environment*, 2015.
- [92] WHO, «Air Quality Guidelines for Europe - Second Edition », 2000.
- [93] C. M. Grossi e P. Brimblecombe, «Aesthetics of Simulated Soiling Patters on Architecture », *Environment Science and Technology*, 2004.
- [94] P. Newby, T. Mansfield, e R. Hamilton, «Sources and Economic Implications of Building Soiling in Urban Areas », 1991.
- [95] «Swedish Corrosion Institute (KIMAB)», 2006. Disponível em: <http://www.corr-institute.se/MULTI-ASSESS>
- [96] K. Toishi e T. Kenjo, «Alkaline Material Liberated Into the Atmosphere from New Concrete», *Paint Technology*, 1967.
- [97] T. Davies, B. Ramer, e G. Kaspyzok, «Indoor/outdoor ozone concentrations ar a contemporary art gallery », *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1984.
- [98] A. Handbook, *2015 ASHRAE Handbook - Heating, Ventilating, and Air-Conditioning*, ASHRAE Handbook. 2015.
- [99] Health and Safety Executive, «Control of Substances Hazardous to Health », 2005.
- [100] P. O. Fanger, «A Confort Equation for Indoor Air Quality and Ventilation », *ASHRAE Journal*, 1988.
- [101] CEN, «Ventilation for Buildings - Design Criteria for the Indoor Environment», 1999.
- [102] Y. Huang, Z. Yang, e Z. Gao, «Contributions of Indoor and Outdoor Sources to Ozone in Residential Buildings in Nanjing», *Int J Environ Res Public Health*, 2019, doi: 10.3390/ijerph16142587.
- [103] G. Tan, «Study of Natural Ventilation Design by Integrating the multi-zone Model with CFD Simulation», Fev. 2005.

- [104] «CONTAM | NIST». Disponível em: <https://www.nist.gov/services-resources/software/contam>
- [105] «Energyplus-Lisbon weather data.». Disponível em: <https://energyplus.net/weather>
- [106] P. Sicard, E. Agathokleous, S. C. Anenberg, A. De Marco, E. Paoletti, e V. Calatayud, «Trends in urban air pollution over the last two decades: A global perspective», *Science of The Total Environment*, vol. 858, p. 160064, 2023, doi: 10.1016/J.SCI-TOTENV.2022.160064.
- [107] S. López-Aparicio *et al.*, «Relationship of indoor and outdoor air pollutants in a naturally ventilated historical building envelope», *Building Environment*, vol. 46, n. 7, pp. 1460–1468, Jul. 2011, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2011.01.013.
- [108] V. Costanzo, R. Yao, T. Xu, J. Xiong, Q. Zhang, e B. Li, «Natural ventilation potential for residential buildings in a densely built-up and highly polluted environment. A case study», *Renewable Energy*, vol. 138, pp. 340–353, 2019, doi: 10.1016/J.RENENE.2019.01.111.
- [109] N. R. Martins e G. Carrilho da Graça, «Simulation of the effect of fine particle pollution on the potential for natural ventilation of non-domestic buildings in European cities», *Building Environment*, vol. 115, pp. 236–250, 2017, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2017.01.030.
- [110] V. Kukadia e J. Palmer, «The effect of external atmospheric pollution on indoor air quality: A pilot study», *Energy Build*, vol. 27, n. 3, pp. 223–230, 1998, doi: 10.1016/S0378-7788(97)00044-3.
- [111] M. Trainer, D. D. Parrish, P. D. Goldan, J. Roberts, e F. C. Fehsenfeld, «Review of observation-based analysis of the regional factors influencing ozone concentrations», *Atmos Environment*, vol. 34, n. 12–14, pp. 2045–2061, 2000, doi: 10.1016/S1352-2310(99)00459-8.
- [112] L. J. Clapp e M. E. Jenkin, «Analysis of the relationship between ambient levels of O₃, NO₂ and NO as a function of NO_x in the UK», *Atmos Environ*, vol. 35, n. 36, pp. 6391–6405, 2001, doi: 10.1016/S1352-2310(01)00378-8.
- [113] P. Brimblecombe, «The composition of museum atmospheres», *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, vol. 24, n. 1, pp. 1–8, 1990, doi: 10.1016/0957-1272(90)90003-D.
- [114] T. Grøntoft e M. R. Raychaudhuri, «Compilation of tables of surface deposition velocities for O₃, NO₂ and SO₂ to a range of indoor surfaces», *Atmos Environ*, vol. 38, n. 4, pp. 533–544, 2004, doi: 10.1016/J.ATMOSENV.2003.10.010.
- [115] A. Acred, «Natural Ventilation in Multi-storey Buildings: a preliminary design approach», Engineering, Environmental Science, London, 2014.
- [116] PORDATA, «Temperatura Média do Ar». Disponível em: <https://www.pordata.pt/db/portugal/ambiente+de+consulta/grafico>

A.1. Ventilação Natural

Por forma a determinar como o software CONTAM traduz o que ocorre na realidade, qual a precisão de resultados e quais os parâmetros de entrada necessários para a realização de uma simulação que transmita confiança nos valores realizou-se um exercício simples. O modelo tem por base uma geometria simples consistindo num edifício de forma cúbica com 6 metros de lado. Não apresenta qualquer divisão ou compartimentação.

A.1.1 Tiragem Térmica

De modo a testar a ventilação por tiragem térmica definiram-se duas aberturas localizadas a cotas diferentes (0.5m e 5.5m) localizadas na mesma fachada. Foram utilizados orifícios circulares ($A_1=A_2=0.0079 \text{ m}^2$) de passagem de ar de apenas um sentido. O coeficiente de descarga considerado foi de 0.6.

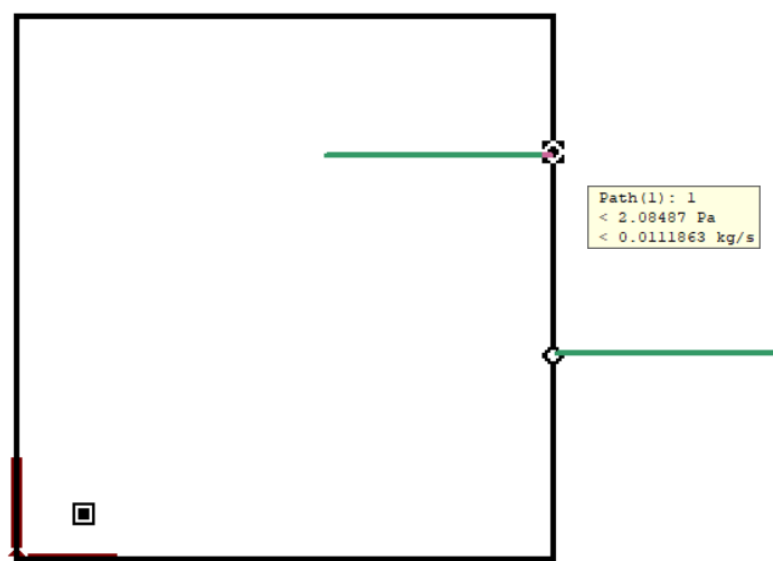


Figura 0.1 - Modelo de teste tiragem térmica

Parâmetros gerais:

- Temperatura Ambiente: 0°C
- Temperatura Interior: 20°C
- HR: nulo
- Velocidade e direção do vento: nulo

Os resultados obtidos no COMTAM indicam um caudal de 0.011 kg/s o que representa 0.0089 m³/s aproximadamente.

O cálculo analítico foi desenvolvido com base na norma BS 5925:1991.

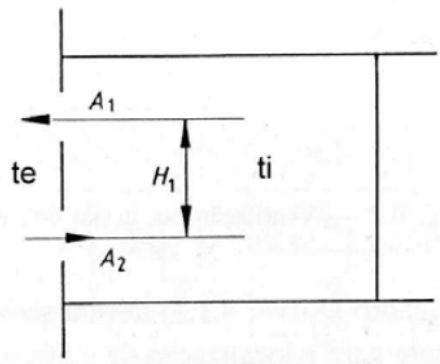


Figura 0.2 - Esquema utilizado para o cálculo analítico [55]

Recorrendo à equação de cálculo proposta na BS 5925:1991 (ver subcapítulo 2.2.3), o caudal de ventilação por tiragem térmica é de 0.0088 m³/s. A diferença de valores pode estar associada a arredondamentos pese embora não seja significativa.

A.1.2 Efeito do vento

O modelo para teste da ventilação por efeito do vento é geometricamente igual. Consideram-se, neste caso, aberturas posicionadas em fachadas opostas, com o objetivo de promover a entrada de ar na fachada de barlavento e saída na fachada de sotavento. Note-se que na Figura 105 o vento incide na estrutura no lado esquerdo.

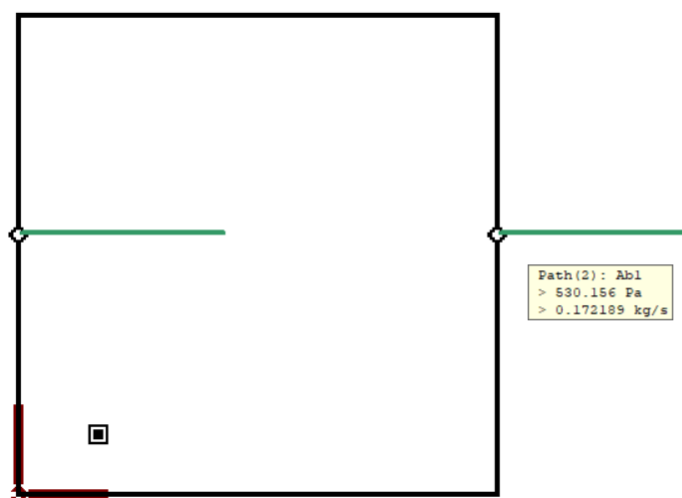


Figura 0.3 - Modelo teste efeito do vento

Parâmetros gerais:

- Temperatura Ambiente: 20°C
- Temperatura Interior: 20°C
- HR: nulo
- Velocidade do vento: 30 m/s

O caudal obtido no programa é de 0.172 kg/s ou 0.137 m³/s.

O caudal de ventilação, por ação do vento, pode ser obtido com a aplicação de uma expressão, proposta na norma britânica BS 5925:1991 (ver subcapítulo 2.2.3). Para que seja possível calcular a diferença de pressão ao nível das aberturas, é necessário apurar os coeficientes de pressão na fachada devido à ação do vento, para tal recorre-se ao procedimento de cálculo instituído na EN 1991 - Parte 4.

O valor analítico obtido foi de $0.140 \text{ m}^3/\text{s}$. A diferença dos valores pode ser justificada por aproximações realizadas no processo de cálculo.



2024

Ricardo Luís Pereira Amado

AVALIAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DOS POLUENTES
AÉREOS EXTERIORES NA QUALIDADE DO AR INTERIOR