U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO AMBIENTE INTERIOR NUM EDIFÍCIO ANTIGO DO PORTO

MATHEUS DO PRADO KARL

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM PROJETO INTEGRADO NA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS

Orientadora: Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira

Coorientador: Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida

JULHO DE 2021

MESTRADO EM PROJETO INTEGRADO NA CONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS 2020/2021

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ dec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Projeto Integrado na Construção de Edifícios - 2020/2021 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2021*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais

"Você pode encarar um erro como uma besteira a ser esquecida, ou como um resultado que aponta uma nova direção"

Steve Jobs

AGRADECIMENTOS

Venho manifestar tamanha gratidão às pessoas que, diretamente ou indiretamente, tiveram um papel crucial para a realização deste trabalho e obtenção dos objetivos, sem eles, não seria possível.

Agradeço a todos os funcionários da Universidade do Porto, dos zeladores ao reitor, que nos proporcionam um ambiente ideal para estudo, em especial a todo o corpo docente envolvivo no Mestrado em Projeto Integrado na Construção de Edifícios, composto por profissionais de alto nível, que me proporcionaram enorme aprendizado ao longo destes dois anos.

À minha orientadora, Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira e ao meu coorientador Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida, meus mais sinceros agradecimentos, por compartilharem vossos conhecimentos, por disponibilizarem todos os materiais e documentos necessários, por toda dedicação, paciência, compreensão e confiança que depositaram em mim para que eu pudesse me sentir "em casa" e confortável para realizar o trabalho.

Aos moradores, assim como eu, do edifício em estudo, meus amigos Victor Landim e Breno Trajano, por toda compreensão e respeito que tiveram pelo meu trabalho, que por muitas vezes tiveram que mudar seus planos para que os ensaios pudessem ser realizados, além de me ajudarem quando, por motivos de força maior, não pude estar presente em algum momento dos ensaios.

Aos meus colegas de curso, por todo respeito, amizade, troca de conhecimentos e experiências ao longo destes dois anos. Em especial aos amigos Fernando Pessoa, Kashmir Soares, Rodrigo Zamim e Yahn Ribeiro, que formaram grupo comigo desde o primeiro semestre, e nunca mediram esforços para ajudar uns aos outros.

À minha família, principalmente meu Pai José Karl e minha Mãe Sueli Karl, por me proporcionarem essa experiência longe de casa, por toda dedicação e confiança que sempre depositaram em mim, sem dúvida os principais responsáveis por tudo isso. Será sempre por eles.

A todos, meu mais sincero agradecimento.

RESUMO

Os edifícios necessitam cada vez mais de intervenções com o intuito de melhorar a ventilação e proporcionar ainda mais conforto aos utilizadores. Tanto a ventilação do local quanto o conforto térmico estão diretamente ligados a saúde humana, que é afetada quando não possuem o equilíbrio adequado entre ambos aspectos.

Dada a problemática, este trabalho tem como objetivo a avaliação do conforto térmico e da ventilação de um edifício antigo em uma zona histórica do Porto.

Para concretizá-los, inicia-se com a descrição dos conceitos a serem estudados em busca de um maior conhecimento sobre todos os aspectos que os influenciam e todas as normas que os abrangem.

Optou-se pela monitorização diária durante os meses de dezembro de 2020, janeiro, fevereiro e março de 2021, da temperatura e humidade relativa, através de equipamentos próprios para tal, no exterior e no interior da habitação, mais especificamente, nos quartos, na sala e na cozinha. Quanto a ventilação, foi realizada uma campanha de ensaios durante os meses de janeiro, fevereiro e março de 2021, nos compartimentos separadamente, utilizando o método do gás traçador e a técnica do declive, em busca de estimar o número médio de renovações do ar por hora e consequentemente a caudal de ventilação dos compartimentos.

Os dados recolhidos foram devidamente tratados com o auxílio de software específico para o assunto e em seguida avaliados e comparados com os limites estipulados pelas normas que abrangem ambos os temas.

E por fim, conclui-se que os métodos e técnicas utilizados são eficazes e permitiram concretizar os objetivos pré definidos, como também apresentar as principais conclusões a respeito dos resultados relacionando-os com as características do edifício.

PALAVRAS-CHAVE: Qualidade do ar interior, Conforto térmico, Ventilação, Monitoração

ABSTRACT

Buildings increasingly need interventions in order to improve ventilation and provide more comfort to users. Both local ventilation and thermal comfort are directly linked to human health, which is affected when they do not have the proper balance between both aspects.

Given the problem, this work aims to evaluate the thermal comfort and ventilation of an old building in a historic area of Porto.

To make them concrete, it begins with the description of the concepts to be studied, in order to improve the knowledge about all the aspects that influence them and all the norms that cover them.

It was decided to make a daily monitoring during the months of December 2020, January, February and March 2021, of the temperature and relative humidity, through proper equipment for this purpose, outside and inside the house, more specifically, in the rooms, in the living room and in the kitchen. As for ventilation, a test campaign was carried out during the months of January, February and March 2021, in the compartments separately, using the tracer gas method and the slope technique in order to estimate the average number of air changes per hour and consequently the ventilation flow of the compartments.

The collected data were duly treated with the help of specific software made for it and then evaluated and compared with the limits stipulated by the norms that cover both themes.

Finally, it is concluded that the methods and techniques used are effective and allowed to achieve the pre-defined objectives, and also to present the main conclusions about the results relating them to the characteristics of the building.

KEYWORDS: Indoor air quality, Thermal comfort, Ventilation, Monitoring.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS i
RESUMO iii
ABSTRACT v
ÍNDICE GERAL vii
ÍNDICE DE FIGURAS ix
ÍNDICE DE QUADROS xi
SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS xiii

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. ENQUADRAMENTO 1
1.2. OBJETIVOS E ESTRATÉGIAS 2
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TEXTO 2

2. QUALIDADE DO AMBIENTE INTERIOR 5
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS 5
2.2. CONFORTO TÉRMICO 6
2.2.1. DESCONFORTO 7
2.2.2. ÍNDICES PMV E PDD 8
2.3. VENTILAÇÃO 10
2.3.1. TIPOS DE VENTILAÇÃO 11
2.3.2. MÉTODO DO GÁS TRAÇADOR 12

3. METODOLOGIA 13
3.1. CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO 13
3.2. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS 16
3.2.1. CONFORTO TÉRMICO 16
3.2.2. VENTILAÇÃO 17
3.2.3. AFERIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS 18
3.3. METODOLOGIA DE ENSAIO 19
3.3.1. CONFORTO TÉRMICO 19
3.3.2. VENTILAÇÃO 22

4. RESULTADOS 25

4.1. CONFORTO TÉRMICO 25

4.1.1. CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE EXTERIOR 25

4.1.2. CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE DO QUARTO 1 26

4.1.3. CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE DO QUARTO 3 28

4.1.4. CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE DA SALA 29

4.1.5. CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE DA COZINHA 31

4.1.6. AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO 32

4.1.6.1. Avaliação do Conforto Térmico no Quarto 1 33

4.1.6.2. Avaliação do Conforto Térmico no Quarto 3 34

4.1.6.3. Avaliação do Conforto Térmico na Sala 35

4.1.6.4. Avaliação do Conforto Térmico na Cozinha 36

4.2. VENTILAÇÃO 37

4.2.1. AVALIAÇÃO DA VENTILAÇÃO NO QUARTO 1 38

4.2.2. AVALIAÇÃO DA VENTILAÇÃO NO QUARTO 3 38

4.2.3. AVALIAÇÃO DA VENTILAÇÃO NA SALA 39

4.2.4. AVALIAÇÃO DA VENTILAÇÃO NA COZINHA 40

5. CONCLUSÃO 43

5.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES 43

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 44

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 45

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 – Ciclo de vida de um edifício e parâmetros da qualidade do ambiente interior [5] 5

Fig.2.2 – Diagrama do conforto humano [9].....6

Fig.2.3 – Escala sétima da ASHRAE [7][12] 8

Fig.2.4 – Gráfico da relação entre PMV e PPD [12] 9

Fig.3.1 – Localização do edifício em estudo 13

Fig.3.2 – Caracterização construtiva do edifício em estudo: a) Paredes exteriores; b) Vãos envidraçados; c) Cobertura e beirado 14

Fig.3.3 – Localização dos compartimentos da habitação em estudo: a) Piso 3; b) Piso 4.....15

Fig.3.4 – Interior da habitação em estudo: a) Acesso à habitação; b) Sala; c) Cozinha; d) Acesso ao piso 4; e) Quarto 1; f) Quarto 2; g) Quarto 3 15

Fig.3.5 – Planta arquitetôtica da habitação.....16

Fig.3.6 – Equipamento para os ensaios de conforto térmico: HOBO® Temp/RH 2.5% Data Logger (UX100-011) [21].....16

Fig.3.7 – a) HOBO® MX CO2 Logger [22]; b) Extintor de CO2; c) Ventoinha 17

Fig.3.8 – Valores medidos pelos sensores HOBO-MX CO2 após calibragem 18

Fig.3.9 – Posicionamento dos equipamentos HOBO-UX100-011, para a medição da temperatura e humidade relativa do ar 20

Fig.3.10 – Método gráfico de avaliação do conforto térmico em função da temperatura operativa e da humidade absoluta segundo a ASHRAE [7] 21

Fig.3.11 – Posicionamento dos equipamentos HOBO-UX100-011 22

Fig.3.12 – Exemplo da Técnica do Declive: a) decaimento temporal da concentração do gás traçador; b) evolução temporal do logaritmo da concentração [11] 24

Fig.4.1 – Variação da temperatura exterior durante a campanha experimental.....25

Fig.4.2 – Variação da humidade relativa exterior durante a campanha experimental.....26

Fig.4.3 – Variação da temperatura no Quarto 1 durante a campanha experimental.....27

Fig.4.4 – Evolução cronológica da humidade relativa 27

Fig.4.5 – Variação da temperatura no Quarto 3 durante a campanha experimental.....28

Fig.4.6 – Variação da humidade relativa no Quarto 3 durante a campanha experimental.....29

Fig.4.7 – Variação da temperatura na Sala durante a campanha experimental 30

Fig.4.8 – Variação da humidade relativa na Sala durante a campanha experimental 30

Fig.4.9 – Variação da temperatura na Cozinha durante a campanha experimental 31

Fig.4.10 – Variação da humidade relativa na Cozinha durante a campanha experimental 32

Fig.4.11 – Gráfico adaptado da ASHRAE55:2013 para avaliação do conforto térmico 33

Fig.4.12 Avaliação do conforto térmico no centro do Quarto 1 33
Fig.4.13 – Avaliação do conforto térmico junto à janela do Quarto 1 34
Fig.4.14 – Avaliação do confroto térmico no centro do Quarto 3 35
Fig.4.15 – Avaliação do conforto térmico no centro da Sala 35
Fig.4.16 – Avaliação do conforto térmico junto à janela da Sala 36
Fig.4.17 – Avaliação do conforto térmico no centro da Cozinha 36
Fig.4.18 – Avaliação do conforto térmico junto à janela da Cozinha 37
Fig.4.19 –Tratamento dos dados para o cálculo das renovações horárias 37
Fig.4.20 – Caudais médios para cada dia de ensaio no Quarto 1 38
Fig.4.21 – Caudais médios para cada dia de ensaio no Quarto 3 39
Fig.4.22 – Caudais médios para cada dia de ensaio na Sala 40
Fig.4.23 – Caudais médios para cada dia de ensaio na Cozinha 41

ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)

Quadro 2.1 - Categorias para o ambiente térmico local [12] 8
Quadro 2.2 – Categorias do ambiente térmico [12] 9
Quadro 2.3 – Vantagens e desvantagens dos tipos de ventilação [17] 11
Quadro 2.4 – Máxima concentração permitida dos gases traçadores [12] 12
Quadro 3.1 – Áreas e volumes dos compartimentos 16
Quadro 3.2 – Características do HOBO® Temp/RH 2.5% Data Logger (UX100-011) [21] 17
Quadro 3.3 – Características do HOBO® MX CO2 Logger [22] 18
Quadro 3.4 – Máximos, mínimos e médias dos valores medidos pelos equipamentos HOBO-MX CO2 após calibragem 19
Quadro 4.1 – Médias, máximos e mínimos da temperatura exterior 25
Quadro 4.2 – Médias, máximos e mínimos da humidade relativa exterior 26
Quadro 4.3 – Médias, máximos e mínimos da temperatura Quarto 1 27
Quadro 4.4 – Médias, máximos e mínimos da humidade relativa no Quarto 1 28
Quadro 4.5 – Médias, máximos e mínimos da temperatura Quarto 3 28
Quadro 4.6 – Médias, máximos e mínimos da humidade relativa no Quarto 3 29
Quadro 4.7 – Médias, máximos e mínimos da temperatura na Sala 30
Quadro 4.8 – Médias, máximos e mínimos da humidade relativa na Sala 31
Quadro 4.9 – Médias, máximos e mínimos da temperatura na Cozinha 31
Quadro 4.10 – Médias, máximos e mínimos da humidade relativa na Cozinha 32
Quadro 4.11 – Taxas de renovações por hora no Quarto 1 (h-1) 38
Quadro 4.12 – Taxas de renovações por hora no Quarto 3 (h-1) 39
Quadro 4.13 – Taxas de renovações por hora na Sala (h-1) 39
Quadro 4.14 – Taxas de renovações por hora na Cozinha (h-1) 40

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

SÍMBOLOS

C - Concentração do gás [ppm]

$C + R$ - Perda de calor sensível pela pele [W/m²]

C_{ex} - Concentração de gás no exterior [ppm]

C_{in} - Concentração inicial de gás no interior [ppm]

CO2 - Dióxido de carbono;

C_{res} - Perda de calor sensível pela respiração, por convecção [W/m²]

E_{res} - Perda de calor latente pela respiração, por evaporação [W/m²]

E_{sk} - Perda de calor latente pela pele, através da evaporação [W/m²]

G - Produção interna do gás [cm³/s]

He - Gás Hélio;

HR - Humidade Relativa;

L - Carga Térmica atuante sobre o corpo

m - Atividade desempenhada pelo indivíduo

M - Taxa metabólica de produção de calor [W/m²]

n - Taxa nominal de troca de ar [h-1]

N2O - Óxido Nitroso

P - Pressão atmosférica, 101325 Pa

PMV - Predicted Mean Vote

PD - Porcentagem de pessoas insatisfeitas [%]

PDD - Predicted Percentage Dissatisfied [%]

P_s - Pressão de saturação do vapor de água [Pa]

P_w - Humidade absoluta [Pa]

Q - Qaudal de ventilação [m³/h]

Q_{res} - Taxa total de perda de calor pela respiração [W/m²]

Q_{sk} - Taxa total de perda de calor pela pele [W/m²]

RPH - Renovações por hora [h-1]

SF6 - Hexafluoreto de enxofre

t - Tempo [s]

T - Temperatura [ºC]

V - Volume [m³]

w - Teor de humidade

W - Trabalho mecânico desenvolvido pelo corpo [W/m²]

φ - Humidade relativa [%]

ACRÓNIMOS

ASTM – American Society for Testing and Materials

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

ISO – International Organization for Standardization

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NP – Norma Portuguesa

OMS – Organização Mundia da Saúde

QAI – Qualidade do ar interior

RECS – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviço

REH – Regulamento dos Edifícios de Habitação

VRP – Ventilation Rate Procedure

ABREVIATURAS

Fig. - Figura

Temp - Temperatura

Ref - Referência

1
INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A qualidade do ambiente interior (Indoor Environmental Quality) é uma preocupação que acompanha o homem a muito tempo. Nota-se, ao longo dos últimos anos, um aumento na quantidade de tempo de permanência de pessoas em ambientes fechados, podendo até 90% do tempo [1], o que tende a crescer devido ao desenvolvimento e aprimoramento do teletrabalho, provocado pelo COVID19. Portanto é desejável que o ar seja fresco e agradável, não cause um impacto negativo nos utilizadores, pois estudos provam que isto não contribui apenas para o seu conforto, mas também para sua saúde e produtividade.

A crise energética dos anos 70 foi o estopim para a conscientização da sociedade sobre a limitação da utilização de fontes de energias não renováveis. Uma das formas de combater essa problemática foi um maior fechamento das entradas e passagens de ar dentro do ambiente, reduzindo a taxa de infiltração no ar e consequentemente reduzindo as taxas de ventilação. Além disso houve uma crescente na utilização de isolamento térmico e o desenvolvimento de caixilharias com menor permeabilidade de ar e corte térmico, que foram outras soluções para reduzir a passagem de ar, tendo um maior controle da temperatura interior sem a necessidade de desgaste energético. A partir de então, passaram a ser considerados apenas parâmetros relacionados a engenharia, economia e estética no planeamento da construção de edifícios, com o objetivo de isolar o edifício do ambiente exterior. Porém, uma taxa de renovação do ar reduzida, significa menor entrada de ar limpo e saída de poluentes, gerando o acúmulo dos mesmos no interior do edifício.

Nos anos 80, começaram a aparecer os sintomas de doença nos utilizadores destes novos edifícios, devido ao acúmulo de poluentes interiores. Este fenômeno ficou conhecido como Síndrome do Edifício Doente (Sick Building Syndrome), que é um conjunto de sintomas relacionados com a exposição a químicos, a partículas ou a material biológico, que não podem ser relacionados com nenhuma causa específica, mas que é aliviada quando o ocupante sai do edifício [2]. Os indivíduos geralmente relatam sintomas como dores de cabeça, náuseas, fadiga, sonolência, irritação dos olhos, nariz, garganta etc. que foi responsável por trazer à tona o impacto que os problemas da qualidade do ar interior têm sobre o conforto, saúde e desempenho dos ocupantes.

A seguir, a qualidade do ar interior foi ganhando cada vez mais relevância, levando a Organização Mundial da Saúde (OMS), em 2000, a reconhecer sua importância, que de acordo com o princípio do direito humano à saúde, todos têm o direito de respirar ar saudável. E de acordo com a própria organização, uma qualidade do ar interior (QAI) aceitável significa que “a natureza física e química do ar interior que é respirado pelos ocupantes de um edifício produz um bem-estar mental, físico e social, não podendo provocar absentismo, doenças e debilidades”.

Portando a ventilação, uma das vertentes da qualidade do ar interior, e o conforto térmico são dois parâmetros importantes para a percepção de um ambiente interior saudável e agradável, que necessitam avaliação para que possa ser possível intervir ou evitar possíveis problemas para a saúde humana.

1.2. OBJETIVOS E ESTRATÉGIAS

Em função da problemática exposta previamente, o presente trabalho tem como objetivo a caracterização do ambiente interior dos compartimentos da habitação localizada na Rua de São Francisco de Borja 18, 2° andar, no Porto, possibilitando a avaliação do conforto térmico, avaliação das taxas de renovação horária e dos caudais de ventilação, relacionando assim estas variáveis entre si.

Para a concretização destes objetivos principais foram definidas uma série de tarefas essenciais, que se resumem em:

- Reconhecimento das características do edifício a ser estudado, assim como a zona em que se encontra;
- Estudo das normas e regulamentos que abordam os parâmetros a serem estudados, tomando ciência das regras, procedimentos de ensaios, limites definidos para prevenir os efeitos nocivos à saúde humana e métodos de avaliação a partir dos resultados obtidos;
- Realização da revisão sistemática da literatura, buscando selecionar, avaliar e sintetizar o material relevante para embasamento da tese;
- Adquirir conhecimento sobre todos os parâmetros que influenciam no conforto térmico do ser humano e da qualidade do ar interior de um edifício;
- Reconhecer os principais motivos do desconforto do corpo humano como um todo e do desconforto localizado, sabendo diferenciá-los;
- Monitorizar o ambiente interior através de medições da temperatura e da humidade relativa, realizadas nos Quartos 1 e 3, na sala e na cozinha da habitação;
- Efetuar ensaios de ventilação nos Quartos 1 e 3, na sala e na cozinha, utilizando o método do gás traçador, tendo dióxido de carbono como tal;
- Efetuar todo tratamento dos dados registrados pelos equipamentos utilizados;
- Cálculo da humidade absoluta, a partir da medição da humidade relativa e aplicação no gráfico proposto pela ASHRAE55:2013 junto com a temperatura;
- Utilização da técnica do decaimento para cálculo das renovações do ar interior e consequentemente das caudais de ventilação nos compartimentos;
- Avaliação do conforto térmico e da ventilação através dos resultados obtidos, comparando-os com os limites definidos pelas normas que abordam o tema.

1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TEXTO

O conteúdo deste trabalho está dividido nos 5 capítulos descritos a seguir:

- Capítulo 1 – Neste capítulo é feita uma breve introdução, enquadrando o tema na problemática a ser estudada. Também são definidos os objetivos do trabalho, assim como as estratégias para alcançá-los. Além disso, possui a estrutura do texto, que contém uma síntese dos demais capítulos;
- Capítulo 2 – Este capítulo contém uma abordagem mais profunda sobre os conceitos de conforto térmico e ventilação. Quanto a ventilação, está definido o que é a qualidade do ar interior e os fatores que a influenciam, descrevendo a importância da ventilação na extração de poluentes do ar, tendo ligação direta com a saúde humana. Este capítulo também define os tipos de ventilação

assim como suas vantagens e desvantagens e descreve o método do gás traçador. Referente ao conforto térmico, este capítulo possui a sua definição e os parâmetros que o influenciam. Além disso, constam os principais fatores que geram desconforto no ser humano como um todo, contendo o mesmo para o desconforto localizado, e também possui definição e método de obtenção dos índices PMV e PDD. Tanto para a ventilação quanto para o conforto térmico, estão expostas as normas e regulamentos que abordam os temas e que serão utilizados;

- Capítulo 3 – Este capítulo descreve a metodologia utilizada no trabalho, começando pela descrição do caso a ser estudado, com suas características e imagens que tem objetivo de facilitar o entendimento sobre o local, seguido pela descrição dos equipamentos utilizados, tanto para o conforto térmico quanto para a ventilação. Em sequência vem a aferição dos equipamentos que no caso da ventilação, não estava calibrado inicialmente. E por fim a metodologia dos ensaios a serem aplicados, descrevendo o passo a passo que foi realizado para a obtenção de resultados dos dois parâmetros em estudo;
- Capítulo 4 – Na sequência do capítulo 3, vem a apresentação dos resultados obtidos da monitorização da temperatura e humidade relativa e dos ensaios realizados para obtenção das renovações por hora do ar, recorrendo elaboração de gráficos e tabelas para facilitar a análise, seguida da aplicação dos métodos de avaliação escolhidos, contendo uma discussão sobre os resultados destas avaliações;
- Capítulo 5 – Contém as principais conclusões que os resultados nos permitiram chegar sobre este trabalho, além de conter indicações de possíveis trabalhos futuros que possam ser realizados a partir deste.

2
QUALIDADE DO AMBIENTE INTERIOR

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A qualidade do ambiente interior é um conceito de difícil definição, pois se trata de um assunto complexo e extenso, que afeta diretamente a saúde humana e pode agir na degradação dos materiais e elementos construtivos, através da humidade [3]. Este conceito pode ser dividido em quatro grandes áreas, a saber [4]:

- A qualidade do ar interior que envolve o estudo da concentração de micro-organismos ou poeiras no ar e a existência de odores;
- O conforto térmico que envolve as análises referentes a temperatura humidade relativa e velocidade do ar;
- O conforto acústico baseado na existência e no nível de ruídos;
- O conforto visual que se baseia na iluminação natural do local.

Portanto é necessário um estudo amplo de todos os fatores que afetam a qualidade do ambiente interior durante todo seu ciclo de vida do edifício (Figura 2.1).

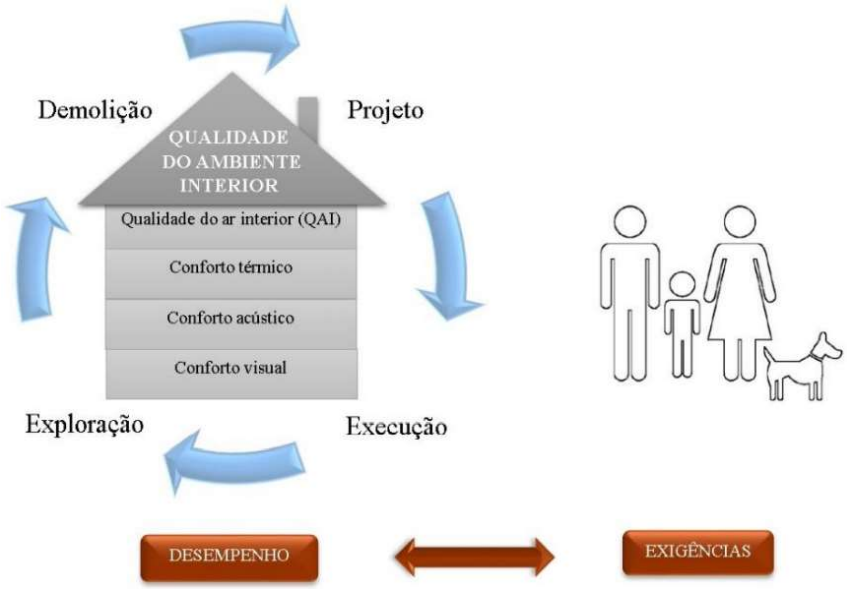


Fig.2.1 – Ciclo de vida de um edifício e parâmetros da qualidade do ambiente interior [5]

2.2. CONFORTO TÉRMICO

Uma boa qualidade do ambiente interior é tida como um dos parâmetros que mais contribui para a produtividade, conforto, saúde e bem-estar dos utilizadores [6], e como foi visto anteriormente, um dos fatores mais importantes é o conforto térmico. De acordo com a ASHRAE 55, o conforto térmico é definido como "a condição da mente que expressa a satisfação com o ambiente térmico" [7]. Uma pessoa está termicamente confortável quando não sente calor nem frio, portanto, é necessário haver um equilíbrio na temperatura do corpo humano e do ambiente em que ele se encontra, porém manter a temperatura do corpo no intervalo aceitável não é o suficiente para se alcançar o conforto térmico, pois este resulta da combinação de basicamente seis parâmetros, que são [8]:

- Atividade desempenhada;
- Isolamento térmico das roupas utilizadas;
- Temperatura do ar;
- Temperatura radiante média;
- Velocidade do ar;
- Pressão parcial do vapor de água no ar ambiente.

Estas variáveis podem ser dividias entre individuais e ambientais. Os individuais são relacionados as condições específicas de cada indivíduo, que são o metabolismo (atividade desempenhada) e o isolamento térmico do vestuário. E os ambientais são a temperatura do ar, a temperatura média radiante, a velocidade e humidade do ar. Estes seis fatores constituem os requisitos mínimos para a avaliação do conforto térmico, pois, além destes, também se verificou a necessidade de estudo de outros parâmetros capazes de influenciar a sensação e a percepção térmica de um indivíduo, que são chamados de comportamentos adaptativos e são divididos entre adaptação física, adaptação fisiológica e adaptação psicológica. Estes parâmetros estão associados à procura do equilíbrio entre o ambiente térmico e as necessidades fisiológicas humanas, a Figura 2.2 mostra a relação de temperatura e humidade relativa, destacando a zona onde este equilíbrio ocorre e as demais zonas onde os usuários necessitam de fatores externos para se sentirem confortáveis.

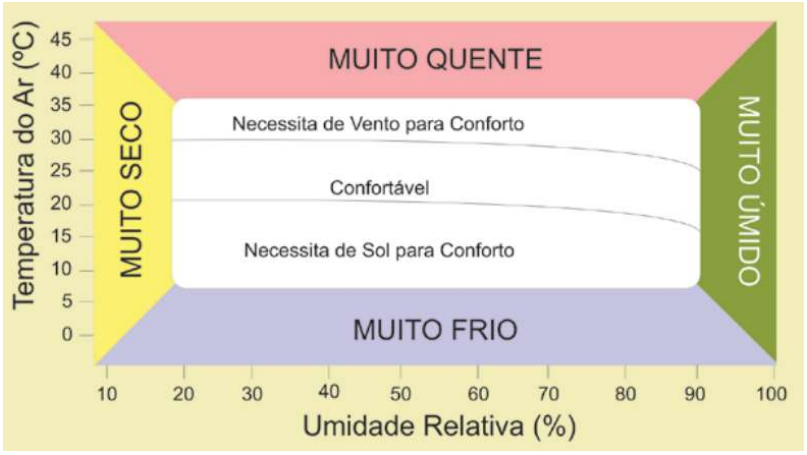


Fig.2.2 – Diagrama do conforto humano [9]

Um outro conceito, introduzido pelo pesquisador dinamarquês Ole Fanger, está relacionado ao conforto térmico, que é a neutralidade térmica, que segundo ele é *"A condição na qual uma pessoa não prefira*

nem mais calor nem mais frio no ambiente a seu redor", ou seja, é quando se atinge o equilíbrio no balanço de calor entre o corpo e o ambiente. Este balanço de energia traduz-se através da equação:

$$M - W = Q_{sk} + Q_{res} \tag{2.1}$$

Que pode ser rescrita em:

$$M - W = Q_{sk} + Q_{res} = (C + R + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) \tag{2.2}$$

Em que:

M - Taxa metabólica de produção de calor (W/m²);

W - Trabalho mecânico desenvolvido pelo corpo (W/m²), sendo que para a maioria das atividades humanas esse trabalho é nulo;

Q_{sk} - Taxa total de perda de calor pela pele (W/m²);

Q_{res} - Taxa total de perda de calor pela respiração (W/m²)

$C + R$ - Perda de calor sensível pela pele (W/m²) - Convecção e radiação. Seu valor é igual a perda de calor por condução até a superfície externa das roupas;

E_{sk} - Perda de calor latente pela pele, através da evaporação (W/m²);

C_{res} - Perda de calor sensível pela respiração, por convecção (W/m²);

E_{res} - Perda de calor latente pela respiração, por evaporação (W/m²).

2.2.1. DESCONFORTO

Quando as condições de conforto não são atendidas, os utilizadores se encontram em um estado de desconforto, que pode ser devido a temperaturas baixas, temperatura baixa e humidade alta, humidade alta, temperatura e humidade altas ou apenas por temperatura alta. Estes motivos são capazes de gerar desconforto na totalidade do corpo humano, chamado desconforto global, porém o conforto global não garante que o indivíduo esteja totalmente satisfeito, pois existem situações em que apenas uma parte do corpo se encontra mais quente ou mais fria que o resto, causando o desconforto local [10]. Normalmente as causas para o desconforto local são [11]:

- Assimetria da temperatura radiante, que se dá pela presença de uma superfície com temperatura diferente, como: parede sem isolamento térmico, janela com vidro simples e com caixilharia inapropriada, entrada de fornos, entre outros;
- Correntes de ar, que reflete uma sensação de frio causada pela: velocidade e temperatura do ar, da intensidade da turbulência, atividade metabólica e resistência térmica do vestuário. Esta sensação de desconforto se dá principalmente nas zonas onde há pouca resistência do vestuário;
- Temperatura do pavimento demasiado elevada ou baixa, como o próprio nome já diz, se trata do contato com uma superfície que se encontra ou muito maior ou muito menor que a temperatura em que o indivíduo se encontra em conforto, causando um desconforto no local de contato;

- Diferenças de temperatura do ar na vertical, ocorre quando há uma diferença de temperatura nos extremos superiores e inferiores do corpo humano, quando por exemplo o corpo em sua maior parte se encontra em estado de conforto, porém os pés ficam gelados.

O Quadro 2.1 apresenta as porcentagens limite de pessoas insatisfeitas, por desconforto local, para cada uma das categorias referidas anteriormente, definidos pela norma ISO 7730:2005.

Quadro 2.1 - Categorias para o ambiente térmico local [12]

Categoria	Desconforto local			
	Assimetria de temperatura radiante	Corrente de ar	Pavimento demasiado quente ou frio	Diferença de temperatura na vertical
	PD* [%]	DR [%]	PD* [%]	PD* [%]
A	< 5	< 10	< 10	< 3
B	< 5	< 20	< 10	< 5
C	< 10	< 30	< 15	< 10

*PD – percentagem de pessoas insatisfeitas.

2.2.2. Índices PMV e PDD

A sensação térmica real sentida por uma pessoa é definida pelo índice PMV (*Predicted Mean Vote*), definido por Fanger através de estudos realizado com pessoas em câmaras climatizadas, onde elas deveriam dar seus votos de acordo com sua sensação dentro das câmaras numa escala de valor entre -3 e 3, tendo como valor ideal 0 (zero). Esta escala é definida como a escala sétima da ASHRAE, ou escala de sete pontos que é representada de acordo com a Figura 2.3:

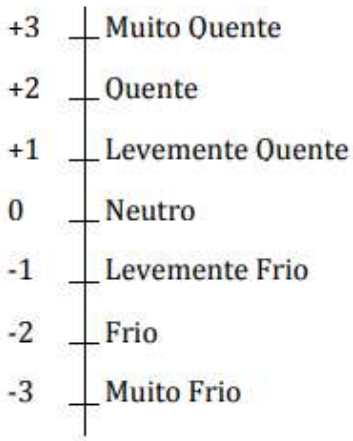


Fig.2.3 – Escala sétima da ASHRAE [7][12]

Portanto, a real sensação térmica sentida por uma pessoa é definida pela equação do PMV:

$$PMV = (0{,}303e^{0{,}036m} + 0{,}028) \times L \quad (2.3)$$

Em que:

PMV - Voto médio estimado, ou voto de sensação de conforto térmico;

m - Atividade desempenhada pelo indivíduo;

L - Carga Térmica atuante sobre o corpo.

A partir do índice PMV, foi se dando valor ao que realmente importa, que é a satisfação das pessoas, criando-se assim o índice PPD (*Predicted Percentage Dissatisfied*), que estima a porcentagem de pessoas insatisfeitas, pois a partir dos estudos realizados verificou-se que mesmo com um PMV ideal, ainda se atinge 5% de insatisfação e uma alteração nos parâmetros só aumentaria esse valor. A equação do PPD é a seguinte:

$$PPD = 100 - 95e^{(-0{,}03353 \times PMV^4 - 0{,}2179 \times PMV^2)} \quad (2.4)$$

Através do gráfico da Figura 2.4 pode-se notar a relação entre PMV e PPD, e que o índice PPD sofre um aumento quando as sensações térmicas se aproximam dos extremos.

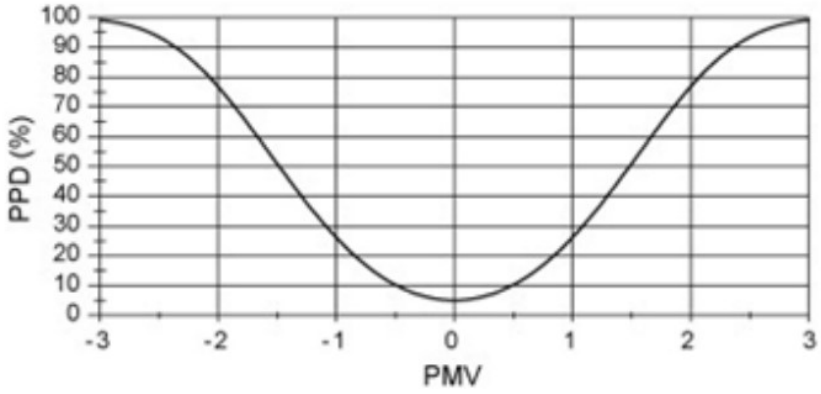


Fig.2.4 - Gráfico da relação entre PMV e PPD [12]

Após a definição destes índices, a ISO 7730 divide os resultados em três categorias (I, II e III) de acordo com o Quadro 2.2:

Quadro 2.2 – Categorias do ambiente térmico [12]

Categoria	PPD (%)	PMV
A	<6	-0,2 < PMV < +0,2
B	<10	-0,5 < PMV < +0,5
C	<15	-0,7 < PMV < +0,7

Onde a categoria A é destinada a locais que abrigam pessoas sensíveis como idosos e crianças, a B para edifícios novos ou remodelados e C para edifícios existentes.

2.3. VENTILAÇÃO

A Qualidade do Ar interior (QAI) é basicamente a interação das características químicas, físicas e biológicas do ar interior com a saúde dos ocupantes do ambiente. A existência e concentração de poluentes no ar interior depende, para além de outros fatores, da ventilação. Portanto é necessário conhecer os contaminantes e suas origens assim como a taxa de renovação do ar, que será responsável por eliminar estes poluentes para que tudo possa ser avaliado, permitindo a implantação de medidas corretivas e de melhoria.

Há ligação direta entre o ar e a saúde humana, pois se o ar interior se encontra poluído e existe uma troca com o pulmão de uma pessoa, estes poluentes terão acesso direto ao órgão, podendo causar danos a ele. Portanto a ventilação é uma estratégia fundamental para controle da qualidade do ar interior, pois realiza a troca do ar interior poluído pelo ar exterior "novo", que se define como renovação do ar, facilitando a evacuação dos gases poluentes prejudiciais à saúde humana e efetuando a limpeza do ambiente interior.

A taxa de ventilação, segundo a norma EN 15251, é a magnitude do fluxo de ar externo para uma sala ou edifício através do sistema de ventilação ou infiltração através do envelope do edifício [13]. Esta taxa, também conhecida como taxa de renovação do ar, se dá pela divisão do caudal de ar novo introduzido em um determinado espaço de estudo pelo volume deste espaço de acordo com a equação:

$$n = {}^{Q}/_{V} \tag{2.5}$$

Em que:

n - Taxa nominal de troca de ar (h^{-1});

Q - Caudal de ventilação (m^3/h);

V - Volume (m^3).

A norma ASHRAE 62, é uma das normas que trata da ventilação, seu objetivo é especificar as taxas de ventilação mínimas e estipular algumas medidas de ventilação natural para se alcançar um nível de qualidade do ar interior que não afete a saúde humana. Em 1973 houve a primeira edição na norma e até hoje em sua última versão de 2010 ela mantém dois procedimentos de abordagem do tema, o IAQ (Indoor Air Quality Procedure) e o VRP (Ventilation Rate Procedure) [14].
O IAQ é o mais antigo, tendo uma abordagem baseada no desempenho. Este procedimento permite calcular a quantidade de ar puro necessário para manter o teor dos contaminantes abaixo dos limites para não afetarem a saúde dos utilizadores.
Já o VRP é um pouco mais completo e relaciona o caudal de ar mínimo exterior insuflado, o qual é especificado por pessoa ou por unidade de área de pavimento, com o tipo de uso do edifício ou espaço. Portanto neste procedimento é determinado o caudal exterior mínimo, baseado no pico de ocupação e no tamanho da zona (taxa de ar novo por pessoa e por unidade de área).
Esta norma é destinada a edifícios novos e remodelações, podendo também ser utilizada para orientação na realização de melhorias de edifícios em utilização.

2.3.1. TIPOS DE VENTILAÇÃO

Existem quatro tipos de ventilação, a natural, a mecânica, a mista e a híbrida.

- A ventilação natural é quando a renovação do ar se dá apenas devido a fatores naturais, como vento e temperatura, ocorrendo as trocas com o ambiente exterior através de aberturas na envolvente que permitem admissão de ar exterior, como janelas, condutas e grelhas, com regulação manual ou autocontroladas. A ventilação natural pode acontecer devido à ação do vento, ação térmica (efeito chaminé) ou pela combinação dos dois fatores [15]. Para garantir uma ventilação natural adequada é necessário que as janelas dos compartimentos principais tenham aberturas adequadas e existam saídas de ar nas casas de banho, as portas de divisões internas devem possuir grelhas ou folgas junto ao pavimento.
- A ventilação mecânica se dá através de sistemas de condutas e aparelhos ventiladores, que trabalham na insuflação do ar exterior e evacuação do ar interior. Porém é necessário que haja controle sobre o caudal de insuflação para garantir uma temperatura interior adequada. Para o controle da temperatura de zonas mais frias, pode ser adotado o sistema duplo-fluxo, que permite pré-aquecer o ar novo por cruzamento com o ar extraído.
- O sistema de ventilação misto consiste na combinação das propriedades dos sistemas de ventilação natural e mecânica, buscando maximizar o desempenho da função [16]. Neste caso, um ventilador mecânico de baixa pressão e potência é automaticamente acionado sempre que as ações naturais não sejam suficientes para assegurar os caudais pretendidos.

O Quadro 2.3 indica as vantagens e desvantagens dos tipos de ventilação anteriormente apresentados.

Quadro 2.3 – Vantagens e desvantagens dos tipos de ventilação [17]

Sistemas	*Vantagens*	*Desvantagens*
Ventilação Natural	• sem consumo de energia para o seu funcionamento; • baixo custo do sistema (instalação, operação e manutenção); • sem ruído emitido pelo funcionamento do sistema;	• caudais e padrão de escoamento variáveis, podendo haver fases em que é necessário incrementar a ventilação por actuação nos dispositivos de ventilação ou abertura de janelas; • possibilidade de inversão do fluxo e, condutas na presença de gradientes térmicos com temperatura exterior superior à interior ($T_{int} \leq T_{ext}$);
Ventilação Mecânica Centralizada	• permite assegurar em contínuo as taxas de ventilação pretendidas; • maior eficiência na extracção de poluentes na fonte; • reduzido espaço ocupado por condutas;	• custo do sistema; • consumo de energia; • nível de ruído (nos casos de implementação deficiente); • custo de manutenção; • quando desligado, a ventilação fica reduzida a valores excessivamente reduzidos; • possibilidade de desconforto devido a correntes de ar; • possibilidade de perturbações na saúde dos ocupantes por falta de manutenção;
Ventilação Mista: ventilação mecânica descentralizada (ventiladores em cada habitação e frequentemente só na cozinha)	• menor consumo de energia que o sistema anterior; • no caso de funcionamento intermitente, maiores taxas de ventilação somente quando são necessárias;	• custo do sistema (menor que o anterior); • consumo de energia (menor que o anterior); • nível de ruído (maior que o anterior); • custo de manutenção; • espaço ocupado por condutas; • correntemente funcionam intermitentemente; • possibilidade de inversão de fluxo na instalação sanitária; • possibilidade de perturbações na saúde dos ocupantes por falta de manutenção; • normalmente são muito mal implementos, devido a não existirem normas ou métodos de cálculo;

2.3.2. MÉTODO DO GÁS TRAÇADOR

O Método do Gás Traçador é utilizado para avaliar as renovações horárias e os respetivos caudais de ventilação permitindo a avaliação da QAI. Este método consiste na introdução de um gás que habitualmente não está presente no ar do compartimento ou que se conheça a concentração em condições normais, registando-se a evolução temporal da sua concentração [18]. A ISO 16000-8 define um conjunto de requisitos que os gases traçadores devem possuir para serem utilizados [19][20]:

- Ser inofensivo à saúde humana nas concentrações utilizadas;
- Não apresentar odores, ser estável, quimicamente inerte e insípido;
- Não ser absorvível por paredes, mobiliário e outras superfícies;
- Não ser inflamável ou explosivo;
- Não estar presente no ar interior ou exterior;
- Caso esteja presente no ambiente interior, apresentarem concentrações mais baixas que as utilizadas com o gás traçador;
- Não ter efeitos prejudiciais no ambiente;
- Fácil transporte e manutenção.

Esta quantidade de requisitos acaba por tornar impossível de se encontrar um gás traçador ideal, que cumpra com todos eles, porém os gases que são mais utilizados são o gás Hélio (He), o dióxido de carbono (CO2), o Hexafluoreto de enxofre (SF6) e o Óxido Nitroso (N2O), como estes também não conseguem satisfazer 100% das exigências, a escolha parte da facilidade e do tipo de procedimento que irá ser utilizado. O Quadro 2.4 mostra os valores máximos de concentração permitido dos quatro gases mencionados.

Quadro 2.4 – Máxima concentração permitida dos gases traçadores [12]

Gás traçador	Símbolo químico	Máxima concentração permitida (ppm)
Hélio	He	-
Dióxido de carbono	CO_2	5000
Hexafluoreto de enxofre	SF_6	1000
Óxido Nitroso	N_2O	25-100

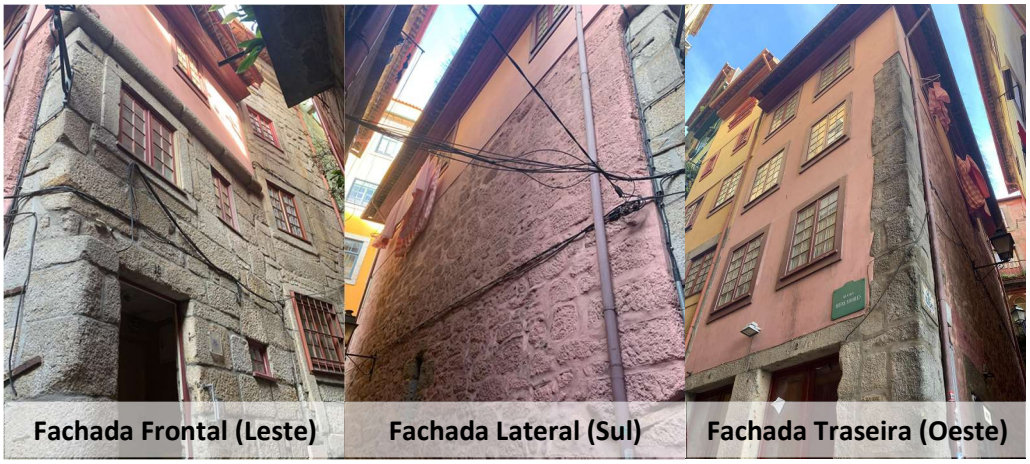
3
METODOLOGIA

3.1. CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

O local em que será realizado o trabalho está localizado na Rua de São Francisco de Borja, junto à Praça da Ribeira, na margem norte do rio Douro (Fig.3.1). O edifício possui três frentes, correspondendo o afastamento aos edifícios opostos a 1,95 m (fachada frontal voltada a leste), 2,15 m (fachada lateral voltada a sul) e 3,43 m (fachada traseira voltada a oeste). Devido ao pequeno afastamento face aos edifícios opostos, não se verifica praticamente a ação direta do sol no interior dos compartimentos. As paredes exteriores são em alvenaria de pedra, exceto no último piso, que são em alvenaria de tijolo, tal como as interiores (Fig.3.2a). As janelas são de batente, com caixilharia em madeira, vidro simples e portas interiores em madeira (Fig.3.2b). A cobertura tem estrutura de madeira com revestimento em telhas cerâmicas (Fig.3.22c).



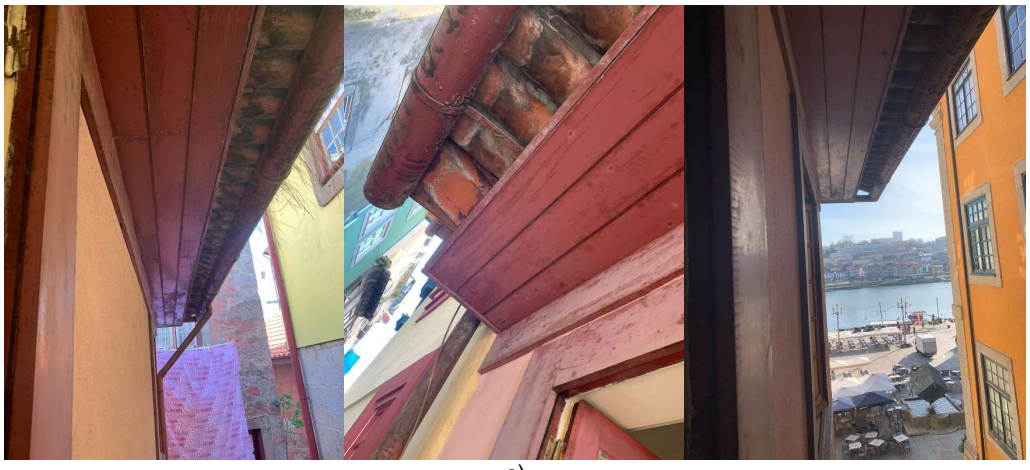
Fig.3.1 – Localização do edifício em estudo



a)



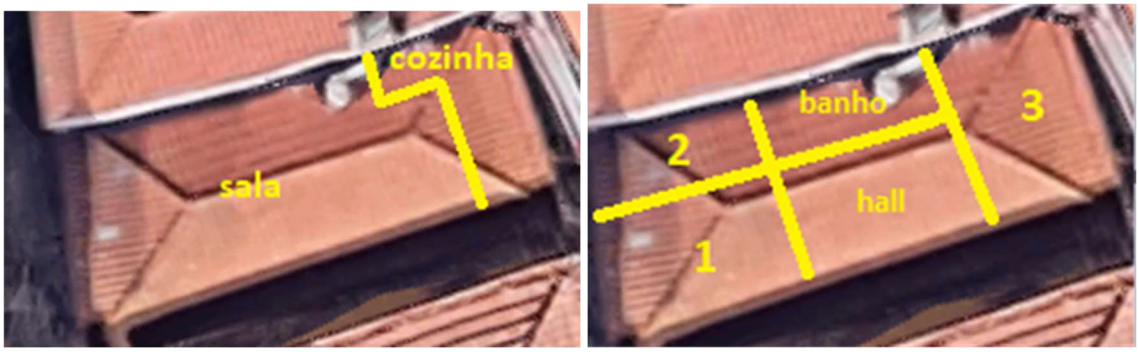
b)



c)

Fig.3.2 – Caracterização construtiva do edifício em estudo:
a) Paredes exteriores; b) Vãos envidraçados; c) Cobertura e beirado

O edifício tem 4 pisos, R/C para comércio e 3 pisos elevados para habitação. A habitação em estudo é constituída por 2 pisos (3º e 4º pisos), sendo que a habitação localizada no 1º piso está sem ocupação. No 3º piso, Figura 3.3a), localizam-se a cozinha e a sala e no 4º piso três quartos e uma casa de banho Fig.3.3.3b).



a) b)

Fig.3.3 – Localização dos compartimentos da habitação em estudo: a) Piso 3; b) Piso 4

A casa de banho não tem vão para o exterior, sendo a extração do ar mecânica, acionada pelo utilizador quando se liga a luz. Na cozinha a exaustão também é mecânica e acionada pelo utilizador. Na Fig.3.4 apresentam-se algumas imagens do interior da habitação, nomeadamente.



a) b) c1) c2)

d) e) f) g)

Fig.3.4 – Interior da habitação em estudo: a) Acesso à habitação; b) Sala; c) Cozinha; d) Acesso ao piso 4; e) Quarto 1; f) Quarto 2; g) Quarto 3

Foi elaborada uma planta arquitetônica da habitação, como mostra a Figura 3.5, para facilitar a visualização do apartamento assim como a obtenção dos dados do Quadro 3.1, que são essenciais para o procedimento de avaliação.

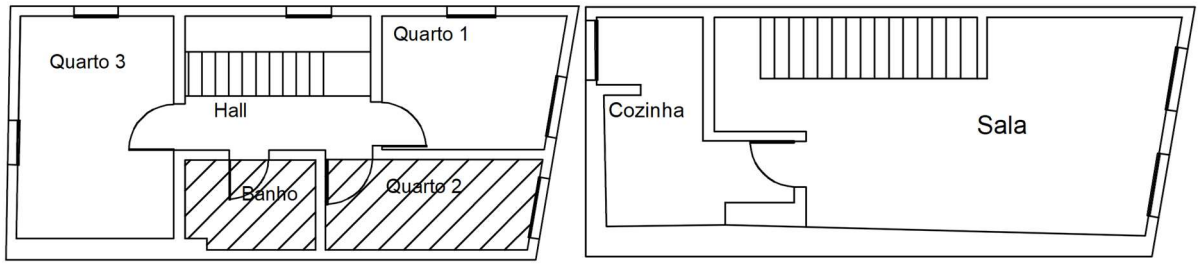


Fig.3.5 – Planta arquitetôtica da habitação

Quadro 3.1 – Áreas e volumes dos compartimentos

	Quarto 1	Quarto 2	Quarto 3	Banheiro	Sala+Hall	Cozinha	Total
Área (m²)	7,34	5,97	10,91	3,6	32,54	7,52	67,88
Volume (m³)	17,76	14,45	26,4	8,71	74,81	17	159,13

3.2. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.2.1. CONFORTO TÉRMICO

Para a realização dos ensaios de conforto térmico foram utilizados nove equipamentos HOBO® Temp/RH 2.5% Data Logger (UX100-011), que são responsáveis pela medição da temperatura e humidade relativa do ar (Fig.3.6). O procedimento de ensaio baseia-se no descrito na norma ASHRAE55:2013, que define a forma de tratamento de dados necessário para avaliar o conforto térmico. O HOBO® Temp/RH 2.5% Data Logger (UX100-011) apresenta as características indicadas no Quadro 3.2.



Fig.3.6 – Equipamento para os ensaios de conforto térmico:
HOBO® Temp/RH 2.5% Data Logger (UX100-011) [21]

Quadro 3.2 – Características do HOBO® Temp/RH 2.5% Data Logger (UX100-011) [21]

Temperature Sensor	
Range	-20° to 70°C (-4° to 158°F)
Accuracy	±0.21°C from 0° to 50°C (±0.38°F from 32° to 122°F), see Plot A
Resolution	0.024°C at 25°C (0.04°F at 77°F), see Plot A
RH Sensor	1% to 95% (non-condensing)
Range	1% to 95% (non-condensing)
Accuracy	±2.5% from 10% to 90% typical to a maximum of ±3.5% including hysteresis at 25°C (77°F); below 10% and above 90% ±5% typical
Resolution	0.05%

3.2.2. VENTILAÇÃO

Para os ensaios de ventilação foram utilizados três equipamentos HOBO® MX CO2 Logger (Figura 3.7a), que efetuam a medição da concentração de CO2 no ar e adicionalmente também mede a temperatura e a humidade relativa. O procedimento de ensaio baseia-se no descrito na norma ASTME741:2000, que permite a avaliação das renovações horárias de um espaço utilizando a técnica do gás traçador – técnica do declive. O gás traçador utilizado foi o CO2, pelo que foi injetado no espaço a ser medido a partir de um extintor de CO2 de 2 kg (Figura 3.7b). Para garantir uma mistura adequada e homogênea do CO2 no ar, também foram utilizadas ventoinhas (Figura 3.7c) em posições estratégicas para a melhor distribuição do gás. O HOBO® MX CO2 Logger apresenta as características indicadas no Quadro 3.3.



a) b) c)

Fig.3.7 – a) HOBO® MX CO2 Logger [22]; b) Extintor de CO2; c) Ventoinha

Quadro 3.3 – Características do HOBO® MX CO2 Logger [22]

Temperature Sensor	
Range	0° to 50°C (32°F to 122°F)
Accuracy	±0.21°C from 0° to 50°C (±0.38°F from 32°F to 122°F), see Plot A
Resolution	0.024°C at 25°C (0.04°F at 77°F), see Plot A
RH Sensor	
Range	1% to 70% RH when CO2 sensor is enabled (non-consensing) 1% to 90% RH when CO2 sensor is disabled (non-consensing)
Accuracy	±2% from 20% to 80% typical to a maximum of ±4.5% including hysteresis at 25°C (77°F); below 20% and above 80% ±6% typical
Resolution	0.01%
CO_2 Sensor	
Range	0 to 5,000 ppm
Accuracy	±50ppm ±5% of reading at 25°C (77°F), less than 70% RH and 1,013 mbar

3.2.3. Aferição dos Equipamentos

Previamente ao início dos ensaios, foi efetuada uma verificação quanto a coerência dos dados medido pelos equipamentos. Os equipamentos do tipo HOBO-UX100-011 se comportaram perfeitamente ao serem colocados um ao lado do outro dentro do mesmo ambiente de teste, apresentando resultados quase idênticos. Já os equipamentos HOBO-MX CO2 não apresentaram resultados coerentes, sendo necessário efetuar a calibragem dos três equipamentos. Basicamente, essa calibragem foi feita através do pressionamento do botão de calibragem durante três segundos, seguido do posicionamento do equipamento em ambiente aberto ao ar livre durante cinco minutos, com o intuito de se obter um valor de 400 ppm, que é o valor aproximado de CO2 encontrado na atmosfera. Após os cinco minutos, os três equipamentos com números de série 80, 81 e 82 foram colocados lado a lado no ambiente de teste, onde permaneceram durante sete horas aproximadamente e apresentaram valores coerentes como mostra a Figura 3.8 e o Quadro 3.4.

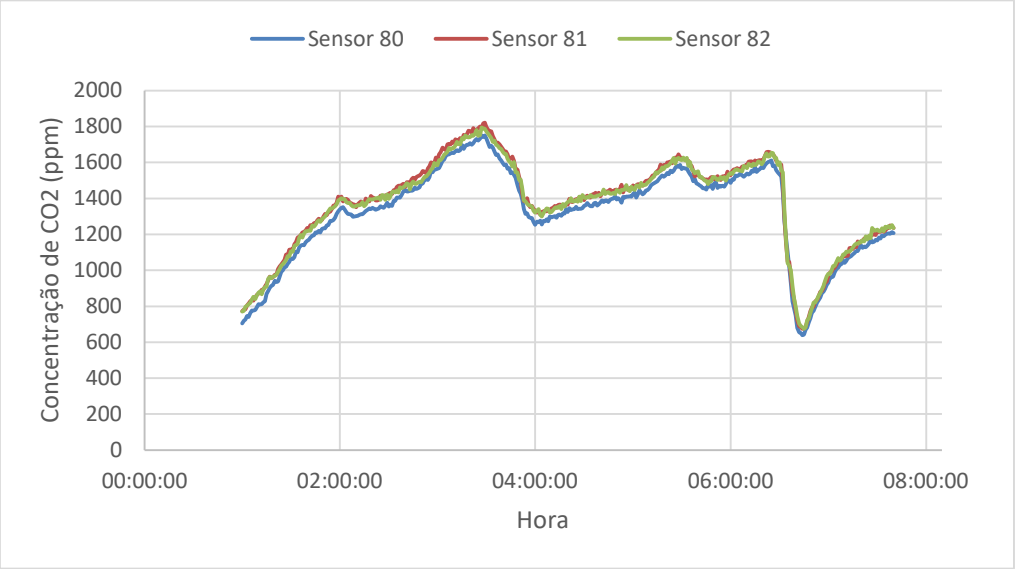


Fig.3.8 – Valores medidos pelos sensores HOBO-MX CO2 após calibragem

Quadro 3.4 – Máximos, mínimos e médias dos valores medidos pelos equipamentos HOBO-MX CO2 após calibragem

	Concentração de CO2 (ppm)		
	Sensor 80	Sensor 81	Sensor 82
Máximo	1752	1823	1796
Mínimo	639	675	675
Média	1322,74	1374,52	1367,30

3.3. METODOLOGIA DE ENSAIO

3.3.1. CONFORTO TÉRMICO

Os ensaios de conforto térmico foram efetuados entre os meses de dezembro de 2020 e março de 2021. A medição da temperatura e humidade relativa foi efetuada de forma contínua durante todo o período de ensaio com os sensores HOBO UX100-011 configurados para armazenarem valores de 10 em 10 minutos. Dos nove sensores de temperatura e humidade relativa, oito foram posicionados no interior da habitação para avaliação do clima no interior dos vários compartimentos e um foi posicionado no seu exterior, por baixo do beiral do telhado (Figura 3.2c), garantindo que não houvesse incidência de radiação solar direta nem de chuva, que poderia afetar os resultados obtidos. Foram colocados dois sensores no Quarto 1 (com dois vãos envidraçados, orientados a sul e a oeste), dois sensores no Quarto 3 (com dois vãos envidraçados, orientados a sul e a leste), dois sensores na sala e dois sensores na cozinha. Em cada compartimento, um dos sensores foi colocado na zona central do espaço a uma cota de 0,90 m e outro junto a uma parede exterior sem envidraçado, também a uma cota de 0,90 m. Para todas as posições, também foi garantido a inexistência de incidência de radiação solar direta sobre os sensores. Pelo menos uma vez por semana, os sensores eram reunidos para a realização da recolha dos dados, e em seguida eram posicionados novamente nos mesmos lugares em que já se encontravam anteriormente. A Figura 3.9 mostra o posicionamento dos equipamentos em cada cômodo da habitação.

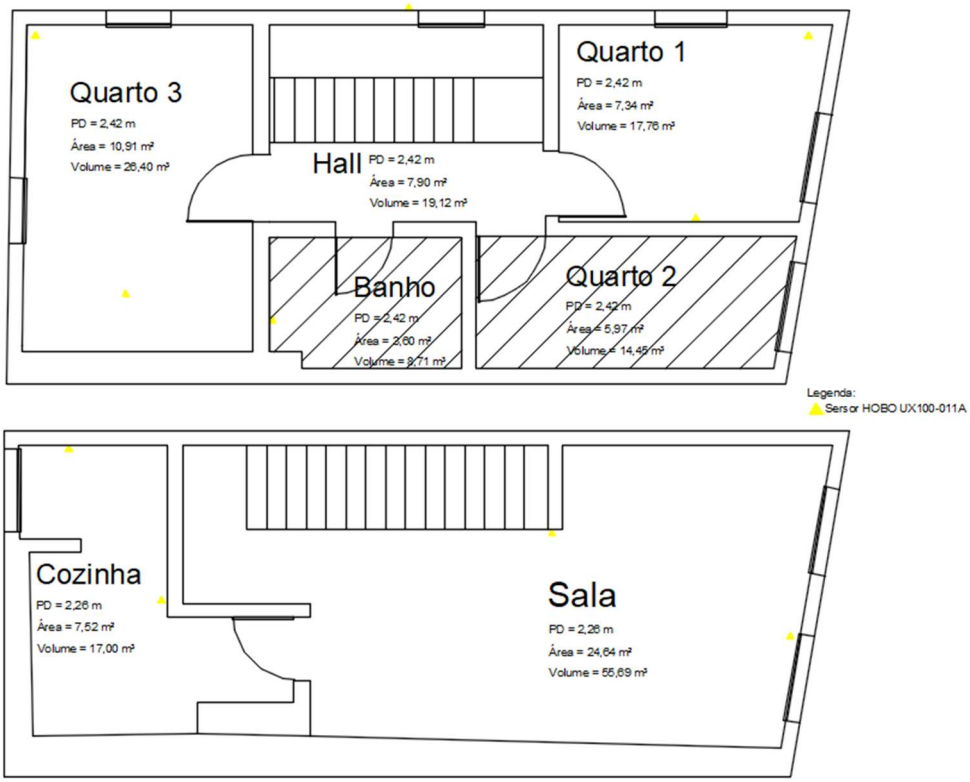


Fig.3.9 – Posicionamento dos equipamentos HOBO-UX100-011 para a medição da temperatura e humidade relativa do ar

Com os valores fornecidos pelos sensores de temperatura e humidade relativa, foram calculados, para cada 10 minutos, os valores da pressão de saturação do vapor de água da humidade absoluta e do teor de humidade como mostram as equações:

$$P_s = 610{,}5e^{\frac{17{,}269T}{237{,}3+T}} \tag{3.1}$$

$$P_w = \frac{\varphi}{100} P_s \tag{3.2}$$

$$\mathrm{w} = \frac{0{,}622 P_w}{P - P_w} \tag{3.3}$$

Em que:

P_s - Pressão de saturação do vapor de água (Pa);

T - Temperatura medida pelo sensor (ºC);

P_w - Humidade absoluta (Pa);

φ - Humidade relativa (%);

w - Teor de humidade;

P - Pressão atmosférica, 101325 Pa.

Para a análise do conforto térmico foi utilizado o método gráfico simplificado onde os limites da zona de conforto são definidos na norma ASHRAE 55:2013, considerando as duas estações que sofrem o maior efeito das temperaturas e humidade, o verão e o inverno, com os níveis de vestuário ajustados para cada estação. Os demais fatores que influenciam no conforto térmico são os responsáveis por criar as fronteiras para as zonas de conforto, definindo os limites superiores e inferiores para a temperatura e a humidade.

O método escolhido traz uma facilidade na avaliação do conforto, pois ele mostra graficamente quais as condições para as quais os usuários se sentiram ou não confortáveis a partir da temperatura operativa e do cálculo da humidade absoluta. A temperatura operativa pode ser aproximada pela média aritmética da temperatura do ar e da temperatura média radiante das superfícies quando se trate de indivíduos em atividades sedentárias, em ambientes sem exposição à radiação solar direta e para velocidades do ar inferiores a 0,10 m/s [3]. O caso de estudo está de acordo com estas condições e ainda se assume que a temperatura média das superfícies é igual à temperatura do ar. A humidade absoluta é calculada através das equações 3.1, 3.2 e 3.3, a partir do conhecimento da humidade relativa e da temperatura do ar. A Figura 3.10 pertence a ASHRAE 55:2013 e nela é possível verificar os intervalos de conforto térmico.

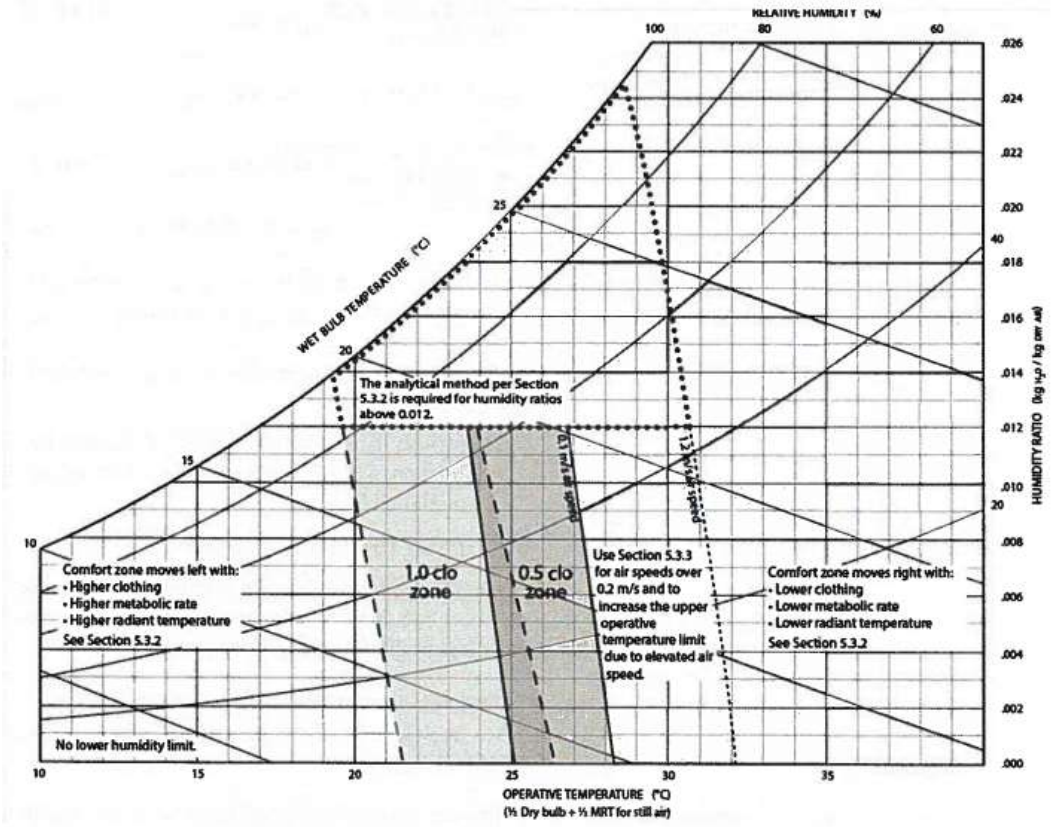


Fig.3.10 – Método gráfico de avaliação do conforto térmico em função da temperatura operativa e da humidade absoluta segundo a ASHRAE [7]

3.3.2. VENTILAÇÃO

Para a realização do ensaio de ventilação foi utilizado o método do gás traçador e para a avaliação da ventilação foi utilizada a técnica do decaimento. O gás traçador utilizado foi o dióxido de carbono (CO2), por se saber a sua concentração média na atmosfera de 400 ppm, e satisfazer as principais exigências mencionadas no capítulo anterior. Os ensaios no edifício foram realizados em cada um dos cômodos separadamente, quartos 2 e 3, cozinha e sala, com objetivo avaliar cada compartimento individualmente. Os ensaios foram efetuados durante os meses de Janeiro, Fevereiro e Março de 2021, sendo efetuados ensaios da concentração de CO2 pelo menos uma vez por semana para cada um dos compartimentos, durante todo o período de ensaio. Para a realização dos ensaios foram mantidas todas as janelas e todas as portas da habitação fechadas, garantindo que a ventilação natural do interior do edifício fosse a única responsável pela evacuação do CO2 do compartimento. Os sensores HOBO MX CO2 foram configurados para realizarem medições de 1 em 1 minuto após o início do ensaio. Dois sensores foram distribuídos pelo compartimento em estudo, sempre na mesma posição para os diferentes dias do mês, a uma cota de 0,90 m [23], e um colocado do lado exterior da porta, também a uma cota de 0,90 m como ilustrado na Figura 3.11. Depois de programados os sensores, o gás CO2 foi liberado do extintor durante alguns segundos no compartimento, até se atingir cerca de 3000ppm [23], com a ventoinha em funcionamento com intuito de espalhar o gás, tendo-se mantido o seu funcionamento durante 5 min após se alcançar os 3000ppm. Depois de desligada a ventoinha, a habitação foi completamente evacuada, para não haver influência do CO2 produzido pelos utilizadores.

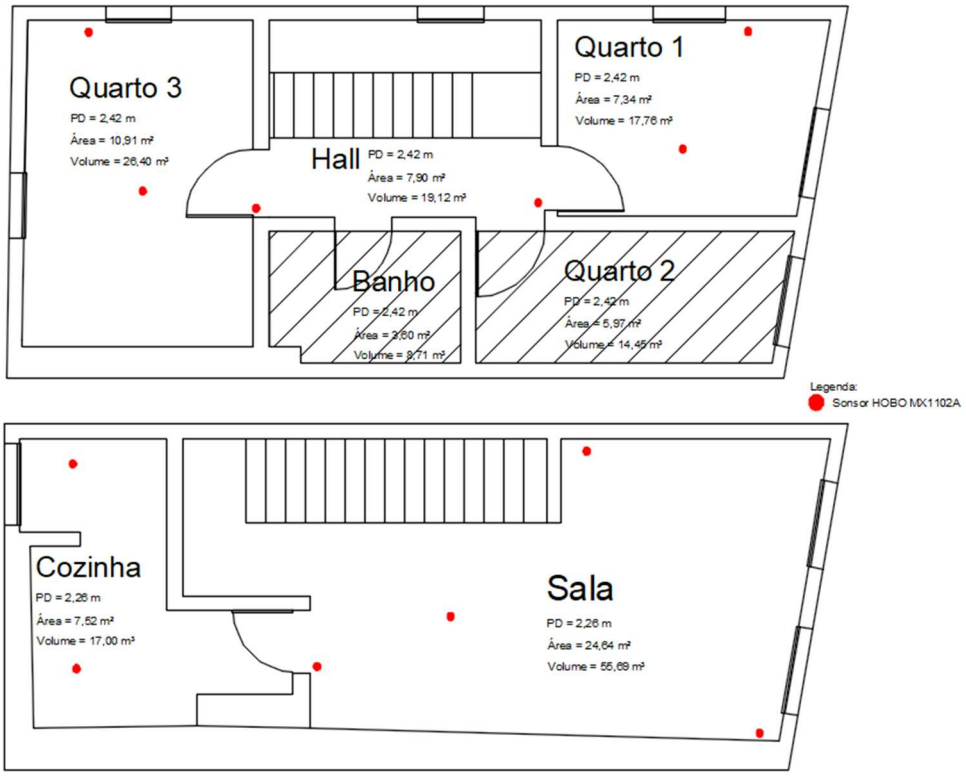


Fig.3.11 – Posicionamento dos equipamentos HOBO-UX100-011

A variação temporal da concentração de um gás numa determinada zona é dependente de três componentes, da sua concentração no ar admitido, da sua concentração no ar extraído e da produção interna desse mesmo gás. Assim, a equação diferencial que traduz este fenómeno é a seguinte [11]:

$$V \times \frac{dC(t)}{dt} = G + Q + C_{ex} - Q \times C(t) \tag{3.4}$$

Em que:

V – Volume (m³);

$C(t)$ – Concentração do gás (ppm);

t – Tempo (s);

G – Produção interna do gás (cm³/s);

Q – Caudal de ventilação (m³/s);

C_{ex} – Concentração de gás no exterior (ppm).

A equação 1 após integração resulta em:

$$C(t) = C_{ex} + \frac{G}{Q} + \left(C_{in} - C_{ex} - \frac{G}{Q}\right) \times e^{-\frac{Q}{V} \times t} \tag{3.5}$$

Em que:

C_{in} – Concentração inicial de gás no interior (ppm).

Considerando que no ar exterior as concentrações de gás são residuais ou nulas, pode-se desprezá-la na equação 2, sobrando:

$$C(t) = \frac{G}{Q} + \left(C_{in} - \frac{G}{Q}\right) \times e^{-\frac{Q}{V} \times t} \tag{3.6}$$

Como a produção de gás traçador no ambiente de estudo é inexistente, a equação 3 se resume em:

$$C(t) = C_{in} \times e^{-\frac{Q}{V} \times t} \tag{3.7}$$

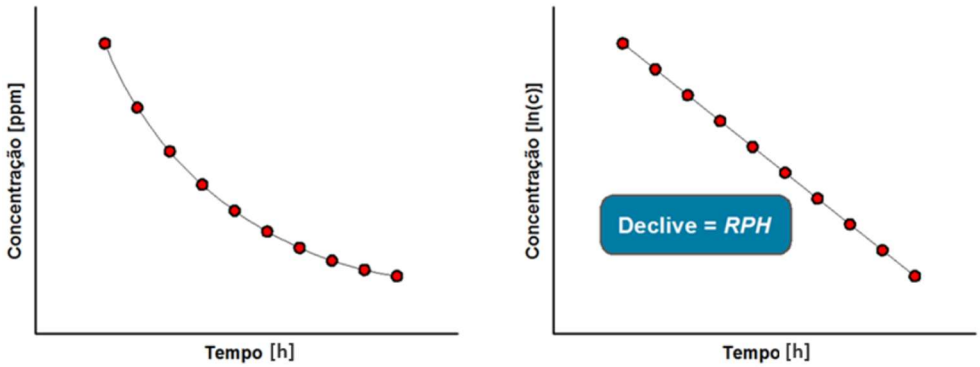
Reorganizando a equação 4 obtém-se:

$$\frac{Q}{V} = RPH = \frac{ln\left(\frac{C_{in}}{C(t)}\right)}{t} \tag{3.8}$$

Em que:

RPH – Renovações por hora (h^{-1}).

Deste modo, é suficiente a introdução do gás traçador até que se atinja uma concentração inicial uniforme C_{in}, para se tornar possível calcular as infiltrações de ar ou caudais de ventilação. A evolução temporal da concentração do gás segue um registo semelhante ao da Figura 3.12a), que em um gráfico ln(C) vs. tempo, é uma reta como mostra a Figura 3.12b). O módulo do declive desta reta, Q/V, representa as renovações horárias, RPH.



a) b)

Fig.3.12 – Exemplo da Técnica do Declive: a) decaimento temporal da concentração do gás traçador; b) evolução temporal do logaritmo da concentração [11]

4
RESULTADOS

4.1. CONFORTO TÉRMICO

4.1.1. CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE EXTERIOR

Para caracterizar o ambiente exterior foi utilizado um sensor de temperatura e humidade relativa. O ensaio teve início dia 20 de janeiro de 2021 e término em 30 de março de 2021. Por problemas técnicos não foi possível iniciar as medições antes da data mencionada.

A Figura 4.1 representa a evolução da temperatura no ambiente exterior ao edifício, que acompanhada do Quadro 4.1 mostra que se atingiu um máximo de 23,00°C exatamente no último dia de experimento em 30 de março de 2021 e um mínimo de 4,43°C no dia 07 de fevereiro de 2021. A média da temperatura exterior foi de 13,90°C.

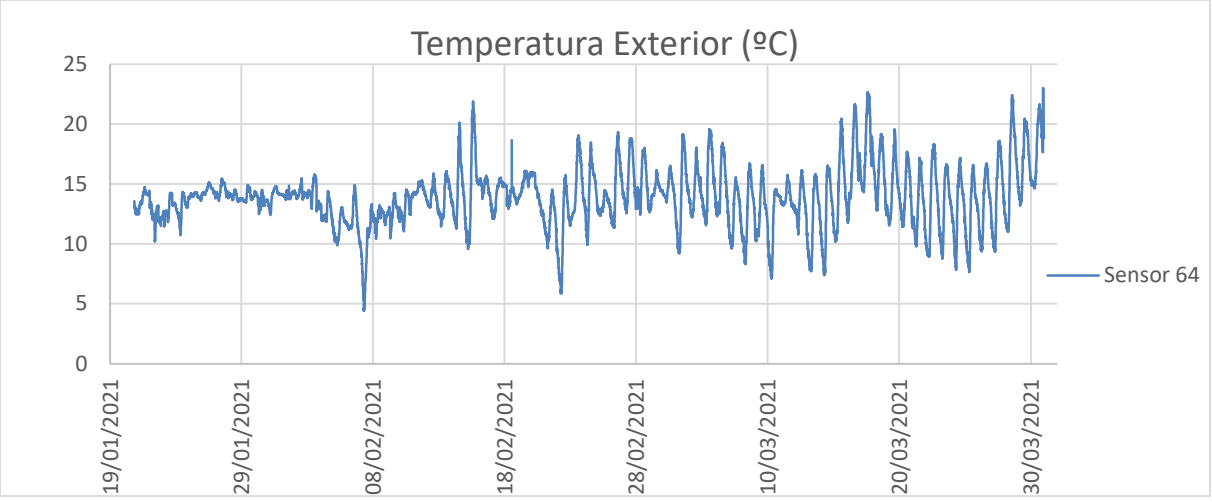


Fig.4.1 – Variação da temperatura exterior durante a campanha experimental

Quadro 4.1 – Médias, máximos e mínimos da temperatura exterior

Temperatura (ºC)			
Posição do Sensor	Média	Máximo	Mínimo
Exterior	13,90	23,00	4,43

A Figura 4.2 representa a variação da humidade relativa no ambiente exterior ao edifício, que acompanhada do Quadro 4.2 mostra que se registrou humidade relativa máxima de 100% no dia 29 de janeiro de 2021, atingindo a saturação durante a noite e uma mínima de 25,29% no dia 17 de março de 2021 durante o fim da tarde. A média da humidade relativa exterior foi de 73,05%.

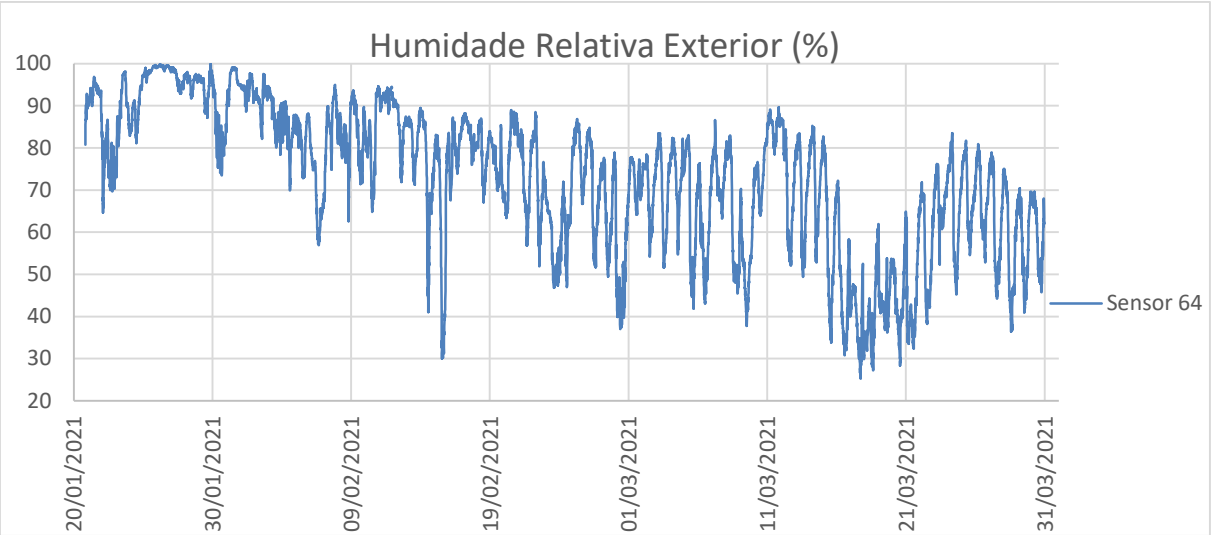


Fig.4.2 – Variação da humidade relativa exterior durante a campanha experimental

Quadro 4.2 – Médias, máximos e mínimos da humidade relativa exterior

Humidade Relativa (ºC)			
Posição do Sensor	Média	Máximo	Mínimo
Exterior	73,05	100	25,29

4.1.2. Caracterização do Ambiente do Quarto 1

No Quarto 1 foram utilizados os equipamentos HOBO com números de série terminados em 50 (posicionado no centro do quarto) e 51 (posicionado próximo a janela do quarto). O ensaio no local teve início dia 20 de dezembro de 2020 e término em 30 de março de 2021. Como pode-se perceber nas Figuras 4.3 e 4.4, houve uma perda de dados por problemas técnicos no começo dos testes, que foram corrigidos em sequência.

A Figura 4.3 representa a evolução da temperatura no Quarto 1, que acompanhada do Quadro 4.3 mostra que se atingiu um máximo de 22,37°C no dia 25 de fevereiro de 2021 e um mínimo de 8,25°C no dia 14 de janeiro de 2021, a menor temperatura registrada no edifício. A média global da temperatura entre os dois equipamentos no interior do Quarto 1 foi de 15,54°C.

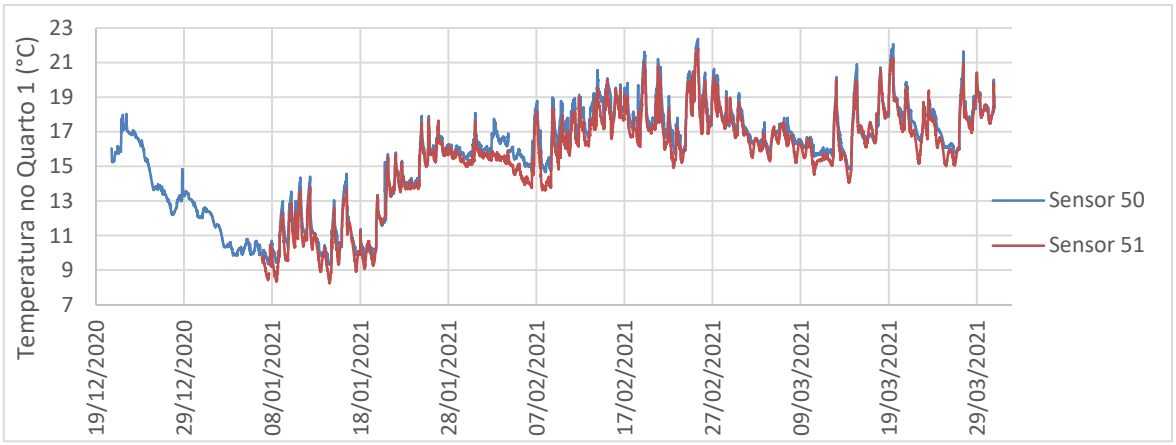


Fig.4.3 – Variação da temperatura no Quarto 1 durante a campanha experimental

Quadro 4.3 – Médias, máximos e mínimos da temperatura Quarto 1

Temperatura				
Posição do Sensor	Média	Global	Máximo	Mínimo
Centro	15,56	15,54	22,37	9,32
Janela	15,52		21,82	8,25

A Figura 4.4 representa a variação da humidade relativa no Quarto 1, que acompanhada do Quadro 4.4 mostra que se atingiu humidade relativa máxima de 96,23% no dia 29 de janeiro de 2021 e um mínimo de 41,89% no dia 18 de março de 2021. A média global da humidade relativa entre os dois equipamentos no interior do Quarto 1 foi de 83,33%.

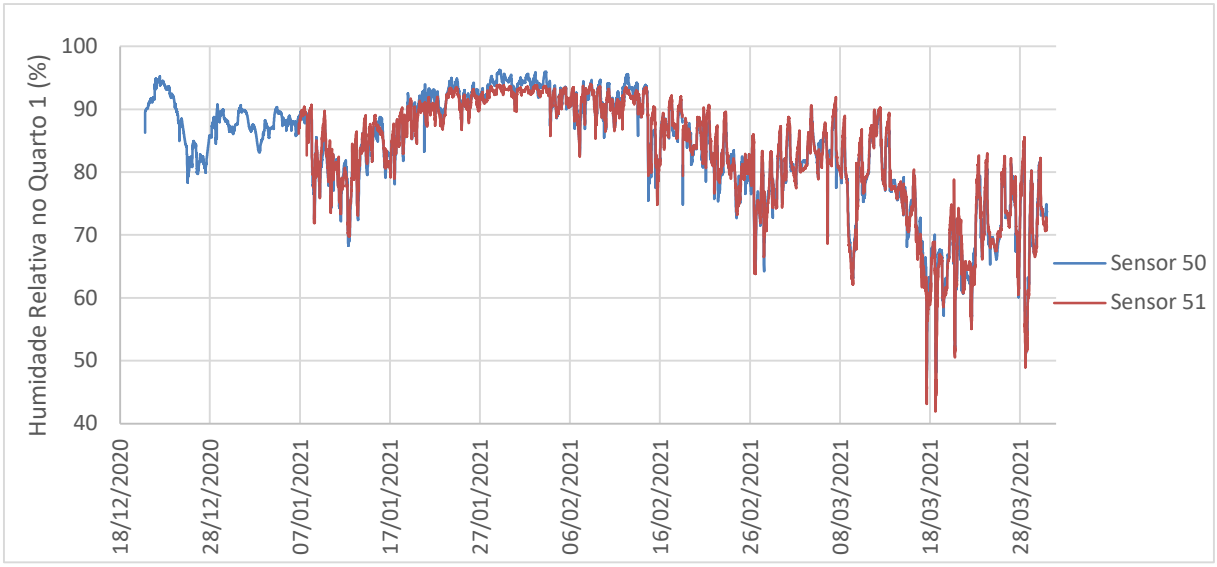


Fig.4.4 – Evolução cronológica da humidade relativa

Quadro 4.4 – Médias, máximos e mínimos da humidade relativa no Quarto 1

Humidade Relativa				
Posição do Sensor	Média	Global	Máximo	Mínimo
Centro	83,68	83,33	96,23	47,21
Janela	82,98		93,99	41,89

4.1.3. Caracterização do Ambiente do Quarto 3

No Quarto 3 foram utilizados os equipamentos HOBO com números de série terminados em 63 (posicionado no centro do quarto) e 53 (posicionado próximo a janela do quarto). O ensaio no local teve início dia 20 de dezembro de 2020 e término em 30 de março de 2021. O equipamento com número de série final 53 apresentou resultados pouco fiáveis ao longo das medições da humidade relativa, portanto decidiu-se não o considerar na interpretação de resultados.

A Figura 4.5 representa a variação da temperatura no Quarto 3, que acompanhada do Quadro 4.5 mostra que se atingiu um máximo de 21,92°C no dia 07 de março de 2021 e um mínimo de 8,30°C no dia 14 de janeiro de 2021. A média global da temperatura entre os dois equipamentos no interior do Quarto 3 foi de 14,69°C.

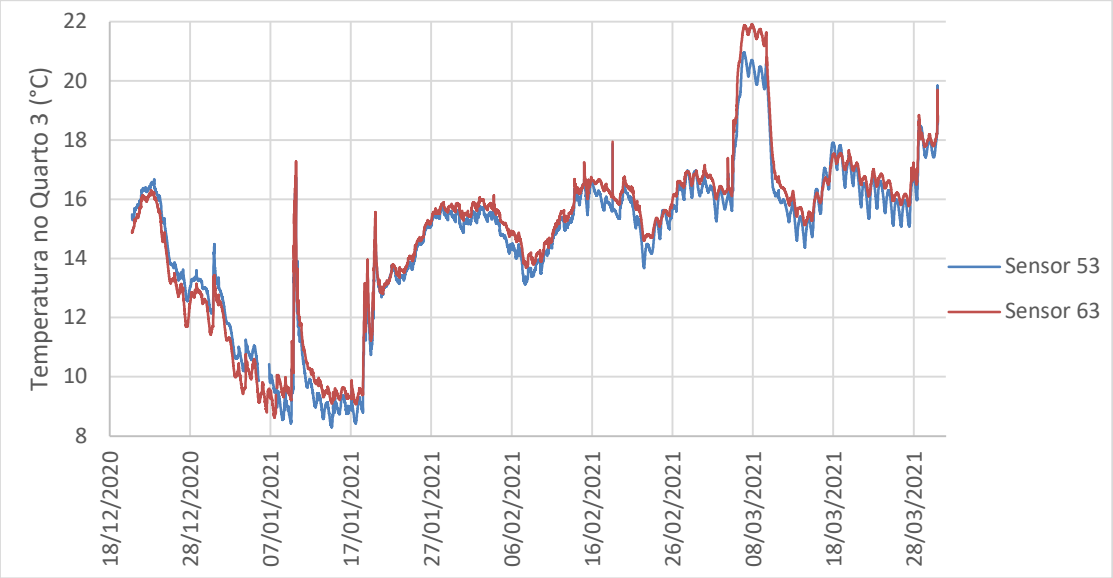


Fig.4.5 – Variação da temperatura no Quarto 3 durante a campanha experimental

Quadro 4.5 – Médias, máximos e mínimos da temperatura no Quarto 3

Temperatura Quarto 3 (ºC)				
Posição do Sensor	Média	Global	Máximo	Mínimo
Centro	14,77	14,69	21,92	8,62
Janela	14,61		20,96	8,30

A Figura 4.6 representa a variação da humidade relativa no Quarto 3, que acompanhada do Quadro 4.6 mostra que se atingiu humidade relativa máxima de 95,56% no dia 27 de janeiro de 2021 e uma mínima de 47,63% no dia 28 de março de 2021. A média da humidade relativa registrada pelo equipamento com número de série final 63 no interior do Quarto 3 foi de 83,02%.

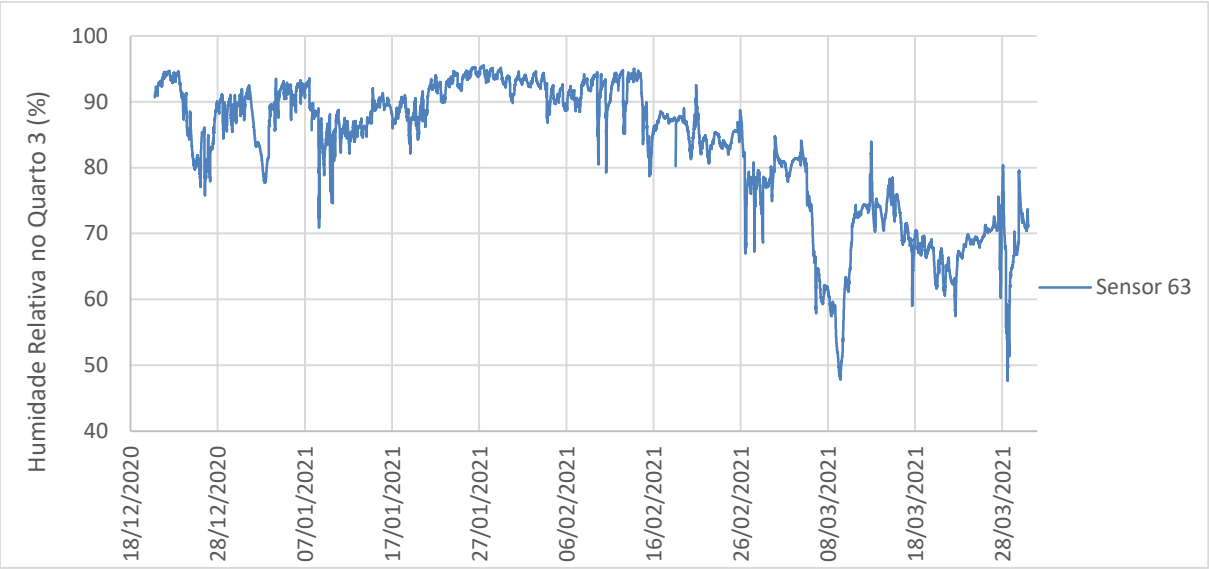


Fig.4.6 – Variação da humidade relativa no Quarto 3 durante a campanha experimental

Quadro 4.6 – Médias, máximos e mínimos da humidade relativa no Quarto 3

Humidade Relativa Quarto 3 (%)			
Posição do Sensor	Média	Máximo	Mínimo
Centro	83,02	95,56	47,63

4.1.4. Caracterização do Ambiente da Sala

Na Sala foram utilizados os equipamentos HOBO com números de série terminados em 62 (posicionado no centro da sala) e 55 (posicionado próximo a janela da sala). O ensaio no local teve início dia 20 de dezembro de 2020 e término em 30 de março de 2021. O aparelho inicialmente posicionado no centro da sala apresentou problemas durante a campanha experimental e teve de ser substituído, fazendo com que houvesse a perda de dados no início das medições.

A Figura 4.7 representa a variação da temperatura na Sala, que acompanhada do Quadro 4.7 mostra que se atingiu um máximo de 25,43°C no dia 14 de fevereiro de 2021 e um mínimo de 9,29°C no dia 19 de janeiro de 2021. A média global da temperatura entre os dois equipamentos no interior do Sala foi de 16,03°C. Os picos observados nas medições obtidas com o sensor 55 resultaram da incidência solar, devido à maior proximidade da janela.

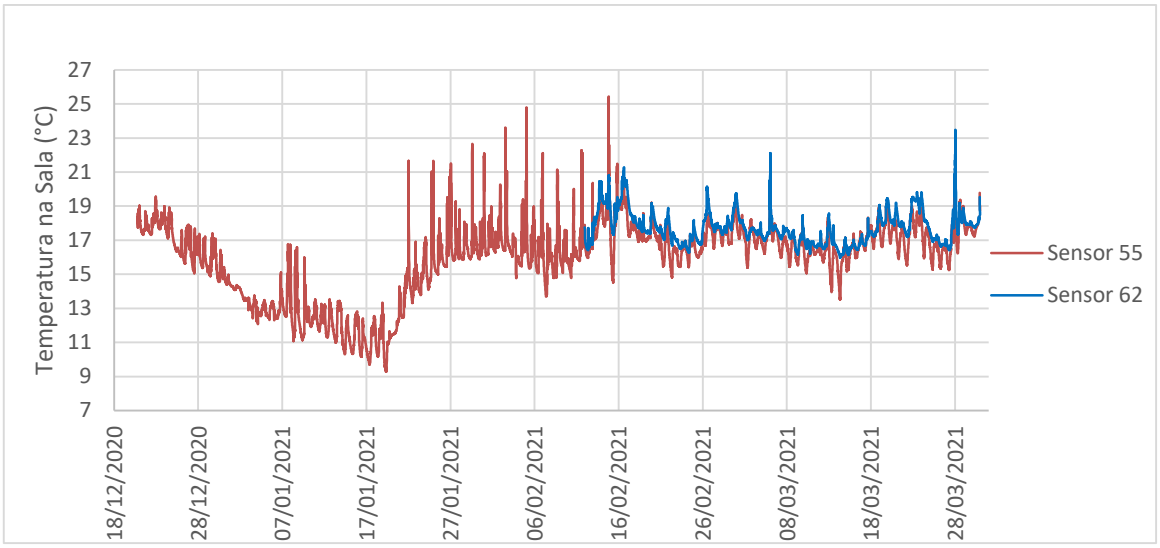


Fig.4.7 – Variação da temperatura na Sala durante a campanha experimental

Quadro 4.7 – Médias, máximos e mínimos da temperatura na Sala

Temperatura				
Posição do Sensor	Média	Global	Máximo	Mínimo
Centro	15,87	16,03	25,43	9,29
Janela	16,20		23,47	10,37

A Figura 4.8 representa a evolução cronológica da humidade relativa na Sala, que acompanhada do Quadro 4.8 mostra que se atingiu humidade relativa máxima de 90,57% no dia 15 de janeiro de 2021 e uma mínima de 40,38% no dia 21 de março de 2021. A média da humidade relativa no interior da Sala foi de 71,89%.

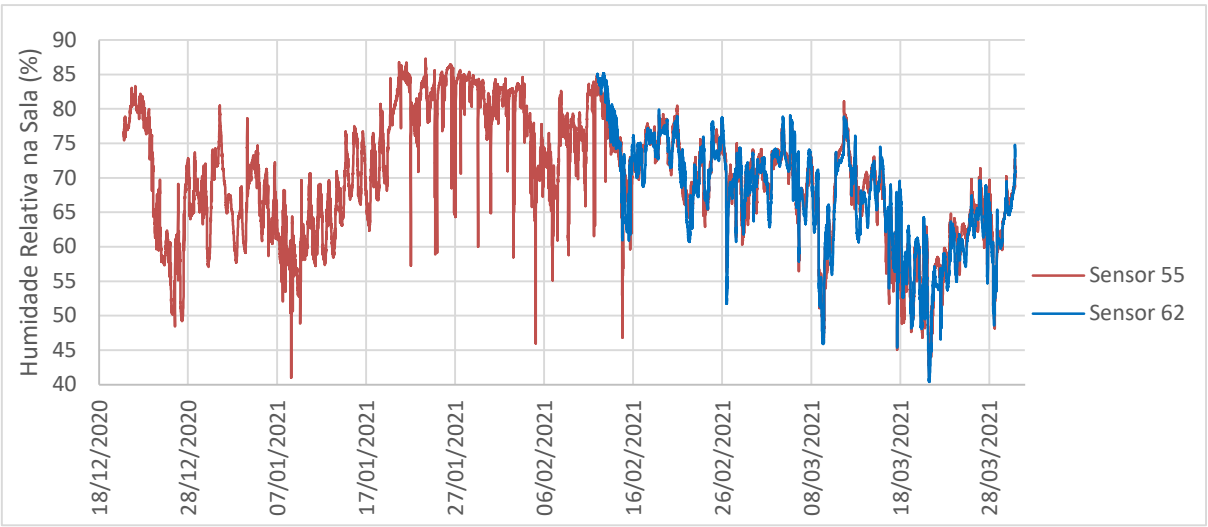


Fig.4.8 – Variação da humidade relativa na Sala durante a campanha experimental

Quadro 4.8 – Médias, máximos e mínimos da humidade relativa na Sala

Humidade Relativa				
Posição do Sensor	Média	Global	Máximo	Mínimo
Centro	70,06	68,76	87,328	40,996
Janela	67,47		85,188	40,381

4.1.5. Caracterização do Ambiente da Cozinha

Na Cozinha foram utilizados os equipamentos HOBO com números de série terminados em 57 (posicionado no centro da cozinha) e 59 (posicionado próximo a janela da cozinha). O ensaio no local teve início dia 20 de dezembro de 2020 e término em 30 de março de 2021, neste ensaio também houve problemas técnicos com o equipamento terminado em 59 que causou a perda de dados.

A Figura 4.9 representa a variação da temperatura na Cozinha, que acompanhada do Quadro 4.9 mostra que se atingiu um máximo de 21,20°C no dia 16 de fevereiro de 2021 e um mínimo de 9,54°C no dia 17 de janeiro de 2021. A média global da temperatura entre os dois equipamentos no interior da Cozinha foi de 15,92°C.

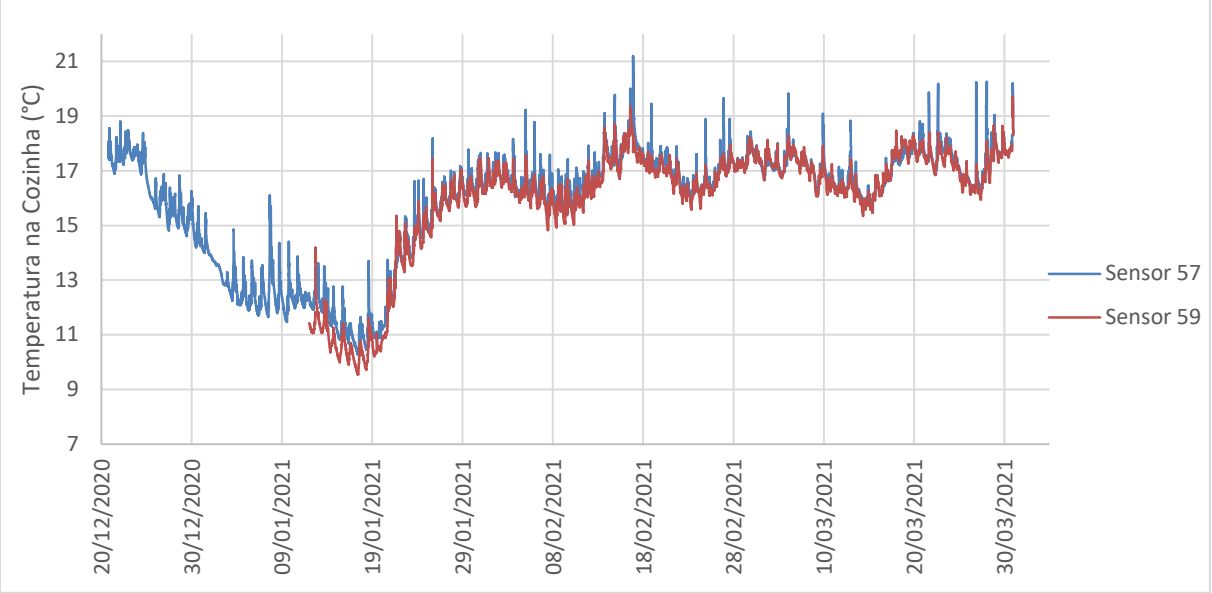


Fig.4.9 – Variação da temperatura na Cozinha durante a campanha experimental

Quadro 4.9 – Médias, máximos e mínimos da temperatura na Cozinha

Temperatura				
Posição do Sensor	Média	Global	Máximo	Mínimo
Centro	15,77	15,92	21,20	10,27
Janela	16,06		19,72	9,54

A Figura 4.10 representa a variação da humidade relativa na Cozinha, que acompanhada do Quadro 4.10 mostra que se atingiu humidade relativa máxima de 93,31% no dia 21 de janeiro de 2021 e uma mínima de 43,76% no dia 21 de março de 2021. A média da humidade relativa registrada pelo equipamento no interior da Cozinha foi de 74,29%.

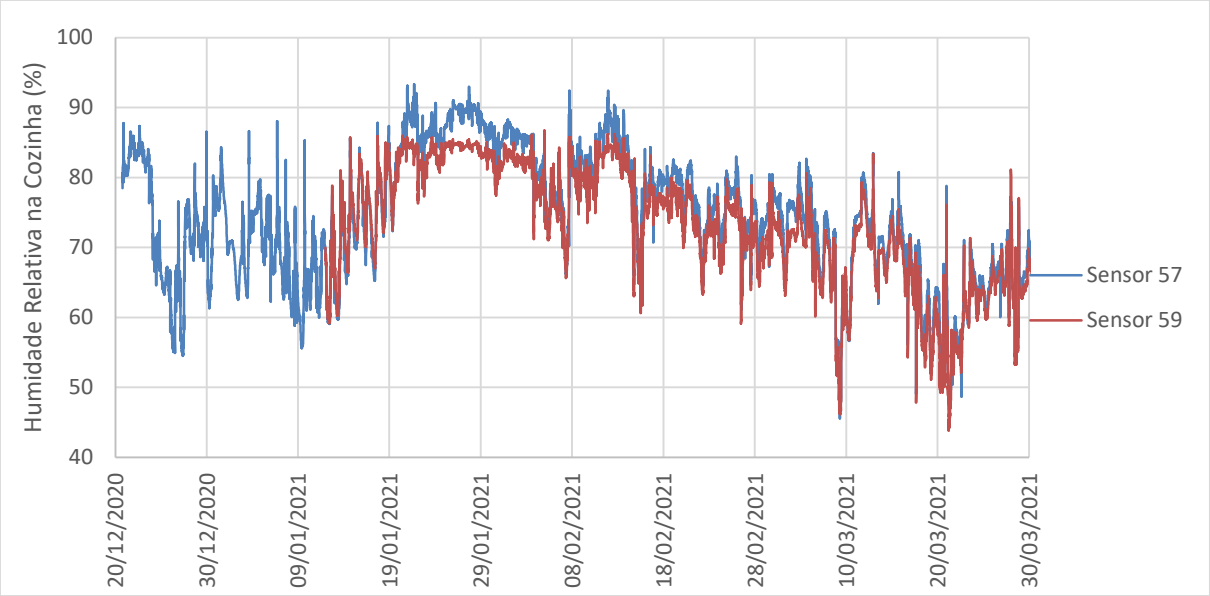


Fig.4.10 – Variação da humidade relativa na Cozinha durante a campanha experimental

Quadro 4.10 – Médias, máximos e mínimos da humidade relativa na Cozinha

Humidade Relativa				
Posição do Sensor	Média	Global	Máximo	Mínimo
Centro	74,34	74,29	93,31	45,55
Janela	74,24		88,08	43,76

4.1.6. Avaliação do Conforto Térmico

Como foi dito anteriormente, foi utilizado o método gráfico disposto pela norma ASHRAE 55:2013. Para poder ser utilizado este método é necessário que a velocidade do ar não ultrapasse 0,1 m/s. As atividades dos ocupantes são consideradas sobretudo sedentárias, o que correspondem a valores de atividade metabólica entre 1,0 e 1,3 met, e considera-se que os utilizadores apresentem vestuário com resistência térmica compreendida entre 0,5 e 1,0 clo, o que corresponde a situação de Verão e a de Inverno, respetivamente [7]. A partir disso, os dados obtidos de temperatura e os valores de humidade absoluta calculados através das equações 3.1, 3.2 e 3.3, foram aplicados no gráfico adaptado que consta na Figura 4.11 com os pontos de cada medição realizada, e em seguida foram calculadas as porcentagens da quantidade de pontos em cada quadrante do gráfico para facilitar a análise.

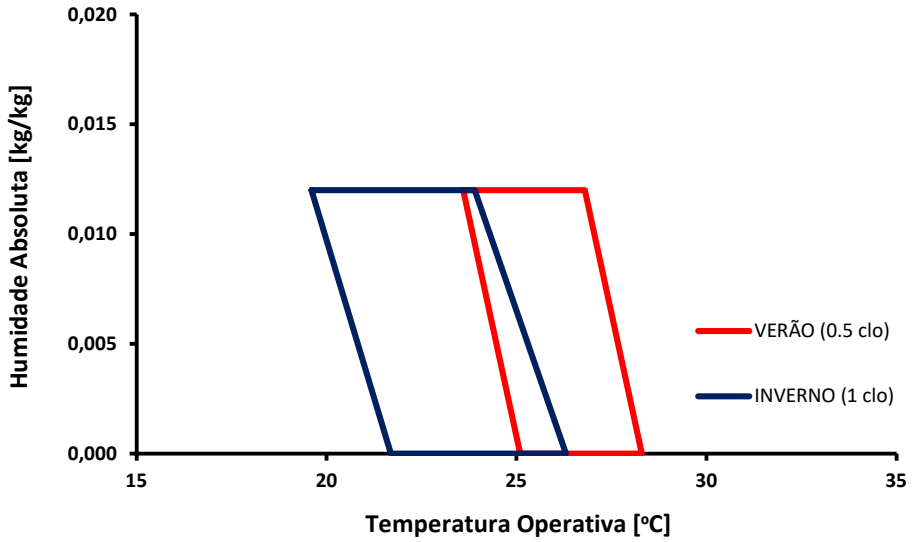


Fig.4.11 – Gráfico adaptado da ASHRAE55:2013 para avaliação do conforto térmico

4.1.6.1. Avaliação do Conforto Térmico no Quarto 1

As figuras 4.12 e 4.13 mostram a avaliação do conforto térmico no Quarto 1. Os resultados apresentam-se em quase sua totalidade fora da zona de conforto, apresentando apenas 2,15% do tempo do período de medições em conforto térmico no centro do compartimento e 1,42% junto à janela. Como os gráficos apontam, esses resultados devem-se no geral às baixas temperaturas, mostrando que em 93,41% e 96,62% do tempo, no centro e junto à janela respetivamente, a temperatura esteve abaixo do definido como confortável para os utilizadores, sendo assim o principal motivo para o desconforto.

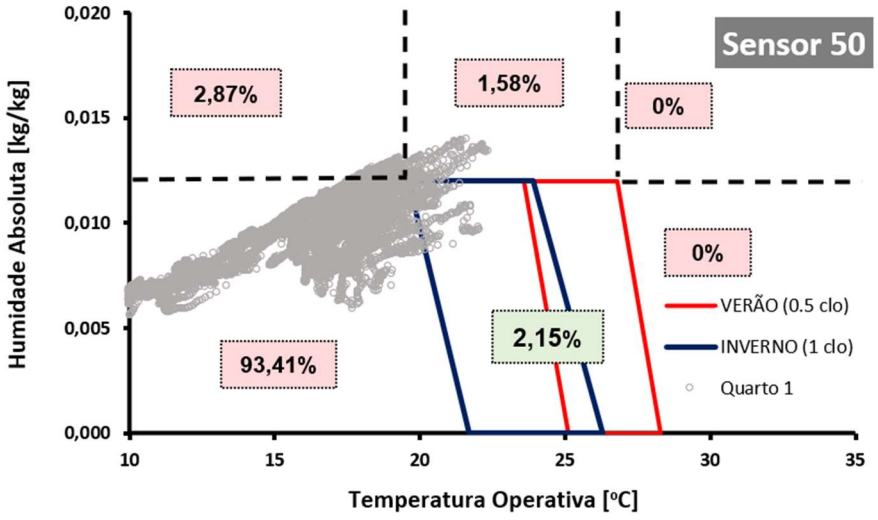


Fig.4.12 Avaliação do conforto térmico no centro do Quarto 1

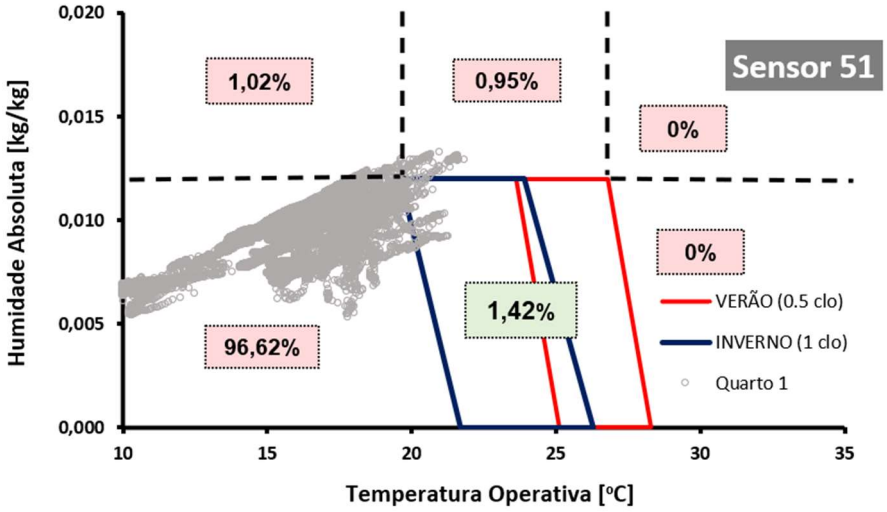


Fig.4.13 – Avaliação do conforto térmico junto à janela do Quarto 1

No centro do Quarto 1 a humidade esteve apenas 4,45% do tempo acima dos 12g/kg [7] (limite superior indicado pela ASHRAE55:2013, para as condições de conforto), e neste período em 1,58% o desconforto foi causado exclusivamente pelo excesso de vapor de água no ar e nos outros 2,87% o desconforto se deu pela combinação de baixa temperatura e humidade elevada. Junto à janela, aquele valor foi menor, atingindo apenas 1,97% do tempo apenas acima dos 12g/kg, e deste período 0,95% o desconforto foi devido apenas ao excesso de vapor de água no ar e nos outros 1,02% o desconforto deu-se pela combinação de temperatura baixa com humidade elevada. Daqui se conclui que o equipamento posicionado na janela mediu temperaturas mais baixas, pois é por lá que ocorrem as renovações de ar e como se trata de uma estação de aquecimento, o fluxo de calor se dá de dentro para fora fazendo com que o interior do cômodo esteja mais quente junto à superfície da parede.

4.1.6.2. Avaliação do Conforto Térmico no Quarto 3

A figura 4.14 mostra a avaliação do conforto térmico no Quarto 3. Como foi dito anteriormente, o equipamento HOBO-UX com número de série terminado em 53 apresentou resultados pouco fiáveis para humidade relativa do ar, afetando diretamente a análise do conforto térmico, portando decidiu-se seguir a avaliação apenas com os resultados obtidos pelo equipamento 63 posicionado no centro do quarto.

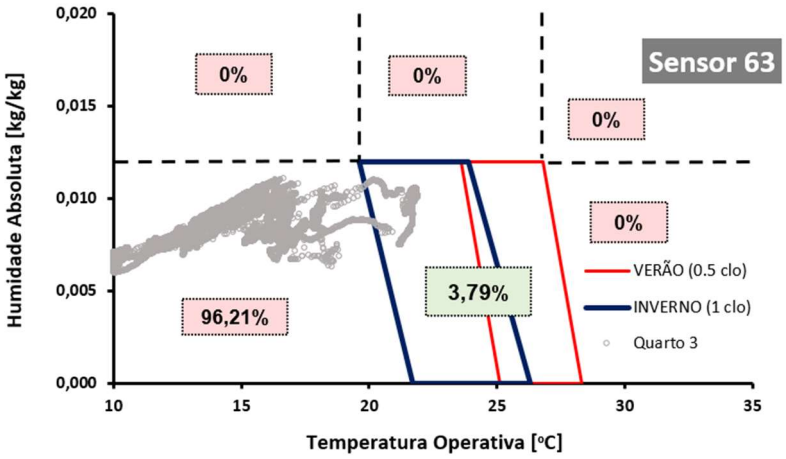


Fig.4.14 – Avaliação do conforto térmico no centro do Quarto 3

Os resultados obtidos no Quarto 3 são os que apresentaram o maior período em conforto térmico, ainda assim apontando apenas 3,79% do tempo como confortável. E neste caso o desconforto foi exclusivamente devido às baixas temperaturas no local, apontando os 96,21% restantes do período de tempo em temperaturas abaixo do limite inferior.

4.1.6.3. Avaliação do Conforto Térmico na Sala

As figuras 4.15 e 4.16 mostram a avaliação do conforto térmico na Sala. Os resultados da sala apresentam uma piora quando comparados aos dos quartos, isto devido ao facto de possuir uma área maior e três janelas, fazendo com que haja movimentação de ar por ventilação como será verificado no Subcapítulo 4.2. O período de conforto térmico no centro da sala foi apenas de 1,42% do tempo do período de medições e de 0,80% junto à janela. Tanto no centro quando junto à janela, o motivo do desconforto foi exclusivamente devido às baixas temperaturas, uma vez que a humidade esteve sempre abaixo dos 12g/kg. No centro o período em que os usuários se sentiram desconfortáveis foi de 98,58% do tempo enquanto junto à janela foi de 99,20%.

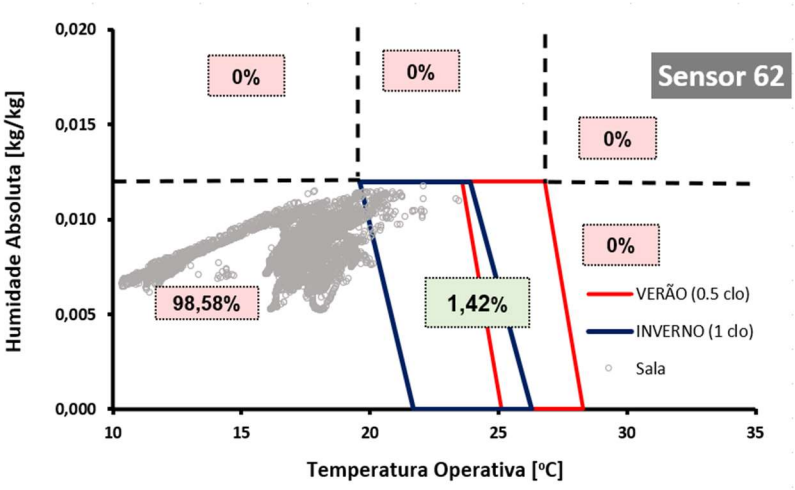


Fig.4.15 – Avaliação do conforto térmico no centro da Sala

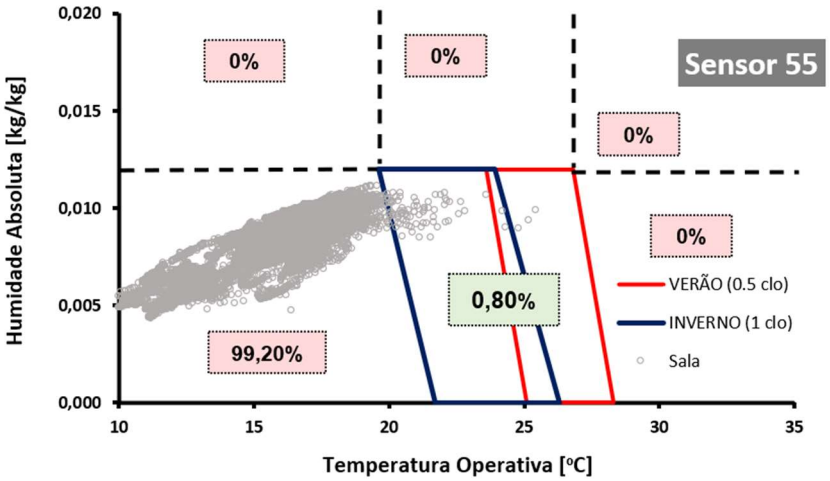


Fig.4.16 – Avaliação do conforto térmico junto à janela da Sala

4.1.6.4. Avaliação do Conforto Térmico na Cozinha

As figuras 4.17 e 4.18 mostram a avaliação do conforto térmico na Cozinha. A Cozinha foi o cômodo que apresentou os piores resultados relacionados ao conforto térmico, quer no centro do compartimento quer junto à janela, estando praticamente 100% do tempo fora da zona de conforto, causado exclusivamente pelas baixas temperaturas. Estes resultados podem ser relacionados ao facto da Cozinha possuir a janela voltada para leste, ter uma porta que não fecha corretamente e estar localizada na pior área do edifício, no primeiro pavimento e rodeada por outros edifícios como se pode verificar na Figura 3.1, impedindo que haja incidência solar no local.

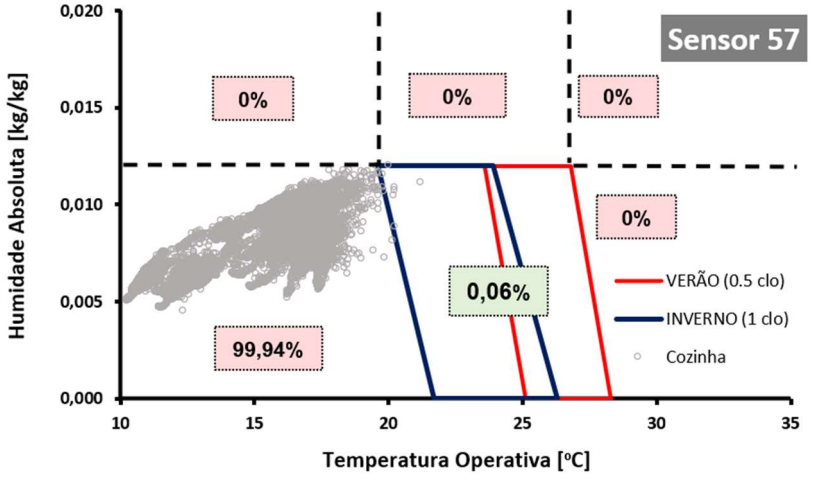


Fig.4.17 – Avaliação do conforto térmico no centro da Cozinha

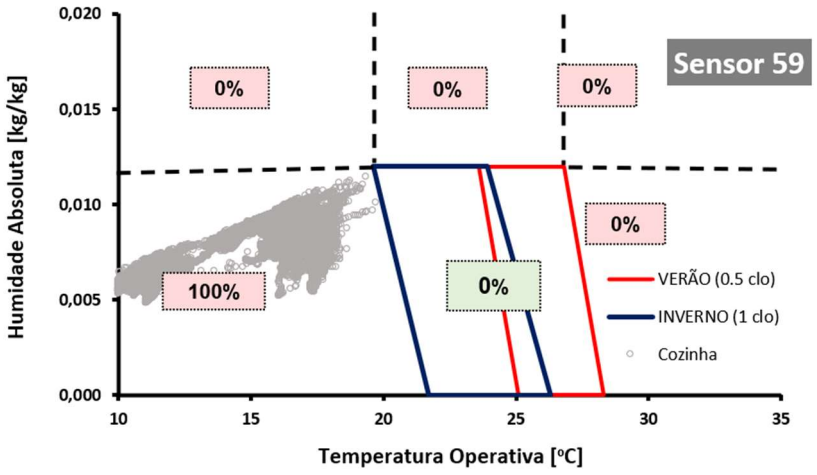


Fig.4.18 – Avaliação do conforto térmico junto à janela da Cozinha

4.2. VENTILAÇÃO

Como dito anteriormente, os ensaios de ventilação foram realizados durante os meses de janeiro, fevereiro e março de 2021, sendo realizados sem alguma hora específica, podendo ser de manhã, a tarde ou a noite e tiveram uma duração variável com no mínimo uma hora, pois quanto mais longo, mais confiável o ensaio se torna. Durante o período de ensaios não foi constatado nenhum tipo de fenômenos ou condições naturais extremas que pudessem afetar os ensaios. O ensaio do dia 27 de janeiro de 2020 realizado no Quarto 1 foi selecionado para exemplificar como foi realizado o tratamento dos dados (Figura 4.19) .

TEMPO	CONCENTRAÇÃO CO2		
HORA	C (medição)	C (sem exterior)	
(h)	(ppm)	(ppm)	LN(C)
0,000	1049	649,000	6,48
0,017	1045	645,000	6,47
0,033	1038	638,000	6,46
0,050	1035	635,000	6,45
0,067	1040	640,000	6,46
0,083	1028	628,000	6,44
0,100	1049	649,000	6,48
0,117	1028	628,000	6,44
0,133	1022	622,000	6,43
0,150	1028	628,000	6,44
0,167	1012	612,000	6,42
0,183	1014	614,000	6,42
0,200	1003	603,000	6,40
0,217	1007	607,000	6,41
0,233	1017	617,000	6,42
0,250	1012	612,000	6,42
0,267	1000	600,000	6,40
0,283	1019	619,000	6,43
0,300	1008	608,000	6,41
0,317	979	579,000	6,36
0,333	994	594,000	6,39
0,350	992	592,000	6,38
0,367	985	585,000	6,37
0,383	977	577,000	6,36
0,400	979	579,000	6,36
0,417	984	584,000	6,37

Liberação do CO2	21:08
Desliga Ventoinha	21:13
Saída de Casa	21:17
Volta Pra casa	00:38

RPH [h^{-1}]	0,282
Volume [m^3]	17,76
Caudal [m^3/h]	5,0

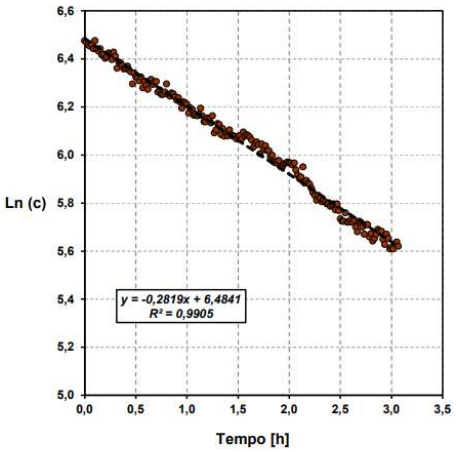


Fig.4.19 –Tratamento dos dados para o cálculo das renovações horárias

4.2.1. Avaliação da Ventilação no Quarto 1

No Quarto 1 foram realizados um total de dez ensaios, e como se pode verificar no Quadro 4.11, obteve-se uma média no seu interior de 0,296 h^{-1} e no seu exterior de 0,408 h^{-1}. No exterior do quarto as renovações por hora são superiores provavelmente devido ao efeito dos dispositivos de ventilação existentes na cozinha e na casa de banho. Quanto à diferente localização no interior do quarto, não se verifica qualquer influência, uma vez que os valores obtidos são idênticos. Os valores obtidos são muito baixos, sobretudo os do interior do quarto, não cumprindo os requisitos da norma NP 1037-1, que aponta para valores de taxas de renovação de ar de 1 h^{-1} [24] nem mesmo o valor mínimo referido no REH de 0,4 h^{-1} [25].

Quadro 4.11 – Taxas de renovações por hora no Quarto 1 (h^{-1})

	Posição	Média		Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
Quarto 1	Fora	0,408		0,136	0,865	0,171
	Centro	0,295	0,296	0,054	0,383	0,181
	Janela	0,296		0,056	0,377	0,197

Quanto ao caudal, a Figura 4.20 identifica as médias dos valores obtidos pelos dois equipamentos localizados no interior do cômodo para cada dia de ensaio, que resultaram em uma média final de 5,225 m^3/h.

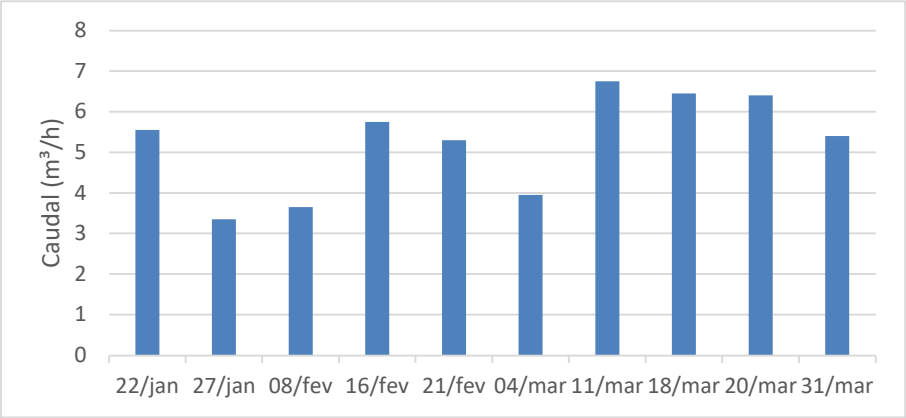


Fig.4.20 – Caudais médios para cada dia de ensaio no Quarto 1

4.2.2. Avaliação da Ventilação no Quarto 3

O Quarto 3 apresentou um comportamento semelhante ao Quarto 1, como era de se esperar, pois os dois possuem áreas parecidas e possuem duas janelas cada, sendo uma de cada orientada ao Sul. Nele também foram realizados um total de dez ensaios e, como se pode verificar no Quadro 4.12, obteve-se uma média no interior de 0,225 h^{-1} , o que também não satisfaz o regulamento nem a norma, e no seu exterior de 0,471 h^{-1}.

Quadro 4.12 – Taxas de renovações por hora no Quarto 3 (h^{-1})

	Posição	Média		Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
Quarto 3	Fora	0,471		0,076	0,660	0,356
	Centro	0,219	0,225	0,067	0,354	0,075
	Janela	0,231		0,065	0,359	0,101

Quanto ao caudal, a Figura 4.21 mostra os resultados obtidos para cada ensaio realizado no Quarto 3, que resultaram em uma média final de 5,935 m³/h.

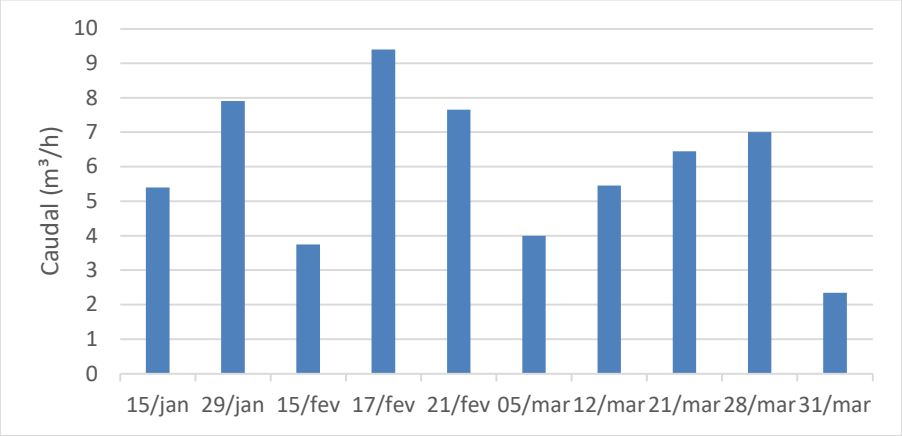


Fig.4.21 – Caudais médios para cada dia de ensaio no Quarto 3

4.2.3. Avaliação da Ventilação na Sala

Na sala foram realizados um total de oito ensaios e obteve um maior número de renovações por hora quando comparada com os quartos, pois possui um volume muito maior de ar, tendo três janelas no primeiro piso voltadas para a fachada que possui um maior distanciamento entre os edifícios vizinhos, e mais uma janela no segundo piso. Como se pode verificar no Quadro 4.13, obteve-se uma média, dentre os três equipamentos distribuídos no cômodo, de renovações por hora de 0,366 h^{-1}, se aproxima do valor mínimo referido no REH [25], ficando, contudo, muito abaixo do indicado na NP 1037-1 (RPH = 1 h^{-1}) [24].

Quadro 4.13 – Taxas de renovações por hora na Sala (h^{-1})

	Posição	Média		Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
Sala	Centro	0,348		0,054	0,423	0,231
	Parede	0,370	0,366	0,055	0,479	0,281
	Janela	0,381		0,037	0,470	0,315

Quanto ao caudal, a Figura 4.22 mostra a média por dia, que neste caso foi realizada entre os três equipamentos dispostos no interior da sala, e que resultaram em uma média final de 27,396 m³/h.

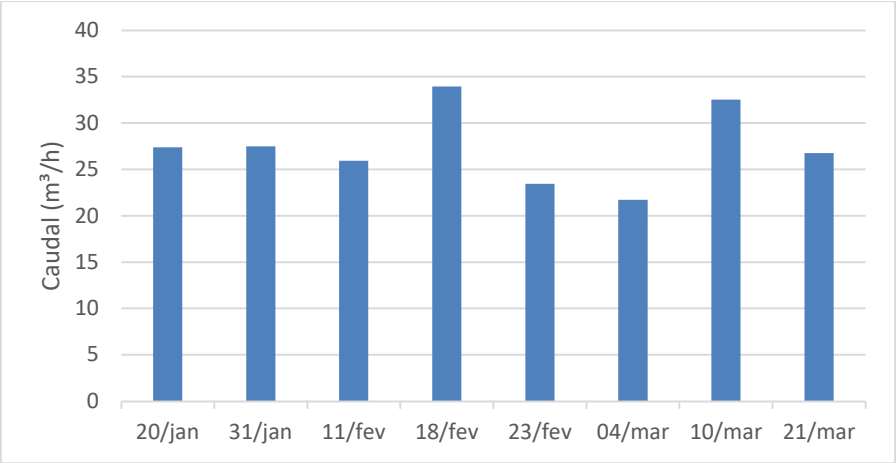


Fig.4.22 – Caudais médios para cada dia de ensaio na Sala

4.2.4. Avaliação da Ventilação na Cozinha

Na cozinha foram realizados também um total de oito ensaios e apresentou o maior número de renovações por hora do ar. Isto pode-se relacionar com o facto de que possui uma porta que não fecha corretamente e com uma fresta maior que as demais portas do edifício, com aproximadamente três centímetros e além disso por conter um equipamento de exaustão mecânica. Como se pode verificar no Quadro 4.14, obteve-se uma média no seu interior de renovações por hora do ar de 0,721 h^{-1} e no seu exterior de 0,488 h^{-1}. Tal como a sala, também a cozinha cumpre o valor mínimo referido no REH [25], e apesar de se aproximar mais, ainda fica abaixo do indicado na NP 1037-1 (Rph = 1 h^{-1}) [24].

Quadro 4.14 – Taxas de renovações por hora na Cozinha (h^{-1})

	Posição	Média		Desvio Padrão	Máximo	Mínimo
Cozinha	Fora	0,488		0,131	0,780	0,303
	Centro	0,694	0,721	0,181	1,002	0,270
	Janela	0,748		0,200	1,156	0,395

Quanto ao caudal, a Figura 4.23 mostra os caudais obtidos nos diferentes dias de ensaio, que resultaram em uma média final de 12,256 m³/h.

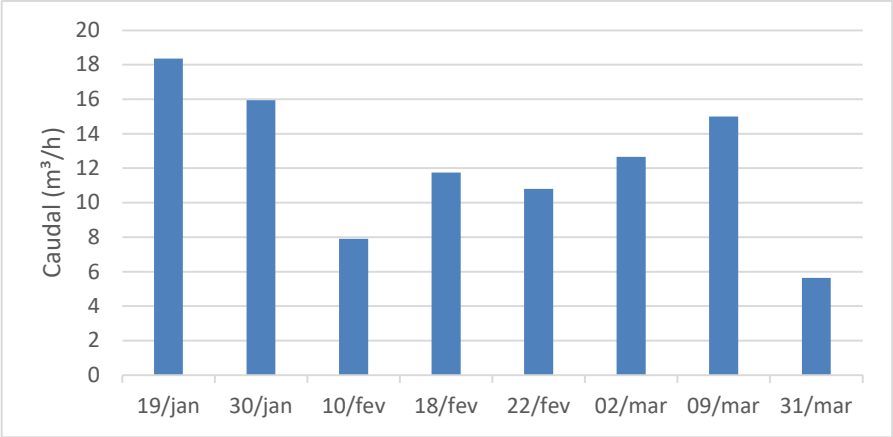


Fig.4.23 – Caudais médios para cada dia de ensaio na Cozinha

5
CONCLUSÃO

5.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

O trabalho realizado permitiu o aprofundamento dos conhecimentos sobre ventilação e conforto térmico, e como isso pode afetar a saúde humana, e permitiu estimar a porcentagem de tempo em que os utilizadores se sentiram confortáveis termicamente, assim como estimar o número de renovações por hora do ar com os respectivos caudais, permitindo analisar os compartimentos individualmente.

Vale destacar que durante o período de ensaio, tentou-se realizar ensaios totalmente idênticos, a não permitir que fatores externos alterassem os resultados, mantendo sempre os parâmetros influenciadores dentro dos previstos em norma. Deste modo os resultados obtidos são validos e pode-se considerá-los representativos para este tipo de edifício.

A partir das avaliações realizadas a respeito do conforto térmico, foi possível retirar as principais conclusões, que são:

- O método de avaliação do conforto térmico apresentou resultados coerentes, levando em consideração as condições da habitação, a zona em que se localiza e a época do ano em que foram realizados os ensaios;
- Quase na totalidade do período de ensaios a habitação se encontrou em estado de desconforto para os utilizadores, majoritariamente devido às baixas temperaturas;
- As temperaturas médias variaram de 14,69 a 16,03°C entre os compartimentos, apresentando as menores temperaturas no piso 3, e as humidades relativas variaram de 68,76% a 83,33%, apresentando maior humidade no piso 4;
- A porcentagem de tempo em que os utilizadores estiveram em conforto térmico é maior nos quartos (piso 4) do que na sala e na cozinha (piso 3);
- O Quarto 3 se apresentou como o compartimento "menos desconfortável" da habitação, apresentando uma porcentagem de 3,79% do período de medições em estado de conforto térmico para os utilizadores;
- A habitação apresentou resultados favoráveis a respeito da humidade, uma vez que ultrapassou o limite de 12g/kg apenas em 0,95% do tempo no Quarto 1 e não ultrapassou nos demais compartimentos da habitação;

Relativamente às avaliações realizadas a partir dos ensaios de ventilação, foi possível retirar as principais conclusões, que são:

- A técnica do decaimento da concentração se apresentou como um método simples e eficaz para se obter as taxas de ventilação;

- Os quartos, localizados no piso 4, obtiveram comportamentos parecidos em relação a ventilação e apresentaram os menores números de renovação por hora, sem conseguir atingir o mínimo de 0,4 renovações por hora estipulado pelo REH;
- A Sala, localizada no piso 3, também apresentou resultados abaixo do regulamento, porém a cozinha, localizada no mesmo piso, apresentou resultados melhores, atingindo uma média de 0,721 renovações por hora, sendo o único compartimento a satisfazer o REH, mas ainda assim fica de fora da norma NP 1037-1 (Rph = 1 h^{-1});
- A cozinha apresentou resultados maiores para o número de renovações por hora e os piores resultados para conforto térmico, evidenciando a grande problemática da necessidade de equilíbrio entre os dois fatores.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como foi visto ao longo do trabalho, a qualidade do ambiente interior abrange uma vasta área de investigação, possibilitando o desenvolvimento de trabalhos futuros acerca do estudo realizado, nomeadamente:

- Estudo da direção e velocidade atrelado aos estudos realizados, a fim de verificar sua influência nos resultados obtidos;
- Realização dos ensaios na estação de arrefecimento para eventual comparação, uma vez que o trabalho foi realizado exclusivamente no inverno;
- Realização dos ensaios em outros tipos de edifícios que não sejam de habitação;
- Realização dos ensaios em um edifício semelhante localizado ao sul, a fim de verificar as diferenças entre norte e sul de Portugal;
- Verificação da influência dos equipamentos de aquecimento e arrefecimento no conforto térmico e economicamente;
- Sugestões de melhorias para a habitação;
- Utilização de um gás colorido nos ensaios de ventilação para verificar os caminhos que o ar toma para evacuar o compartimento;
- Realização dos ensaios com as portas abertas para se ter uma noção de como a habitação se comporta globalmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Heracleous, C., & Michael, A. *Experimental assessment of the impact of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort conditions of educational buildings in the Eastern Mediterranean region during the heating period.* Journal of Building Engineering, November 2019, Vol. 26, 1-15. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100917

[2] Agência Portuguesa do Ambiente. *Qualidade do Ar em Espaços Interiores*. Março de 2009. pambiente.pt/ar-e-ruido/qualidade-do-ar

[3] Ferreira, J. M. N. M. M. *Avaliação experimental e numérica das condições higrotérmicas de edifícios residenciais no arquipélago dos Açores*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, 2018.

[4] Abreu, C. F. C. Capítulo 3: Qualidade do Ar Interior. *O Ambiente Interior E a Saúde Dos Ocupantes de Edifícios de Habitação*. 23-68, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UBI – Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2010.

[5] Soares, S. C. M. *Avaliação da Qualidade do Ambiente Interior no Edifício da Portaria Principal do Porto de Leixões*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2017.

[6] Passarelli, M. A. *QAI e Eficiência Energética. O dilema da concentração de CO2 em edifícios*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2010.

[7] *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, ASHRAE 55, 2013.

[8] Lamberts, R. *Conforto e stress térmico*. Dissertação de Doutoramento, Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

[9] Fante, K., Dubreuil, V., & Sant'Anna Neto, J. *Avaliação comparativa entre metodologias de identificação de situação de conforto térmico humano aplicado ao contexto tropical*, Revista Brasileira de Climatologia, Dezembro 2017, Vol. 21, 588-612.

[10] Da Silva, L. M. T. P. *Avaliação do conforto térmico e da qualidade do ar interior nos edifícios A e B do IPN: Identificação de medidas de melhoria*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, 2015.

[11] De Almeida, R. M. *Avaliação do desempenho higrotérmico do parque escolar reabilitado*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.

[12] *Ergonomics of the Thermal Environment – Analytical Determination and Interpretation of the Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria,* ISO 7730, 2005.

[13] *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings – addressing indoor air quality, thermal environment lighting and acoustics*, CEN – EN 15251, 2006.

[14] *Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*. ASHRAE 62.1, 2013.

[15] Moreira, P. H. A. *Avaliação do caudal de ventilação numa habitação para condições de serviço*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2016.

[16] Clérigo, V. H. O. *Ventilação mista em edifícios de habitação*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2015

[17] Pinto, M., De Freitas, V. P, & Viegas, J. *Qualidade do ambiente interior em edifícios de habitação*. Engenharia e Vida, Setembro 2007, 34-43.

[18] Gonçalves, A. P. M. *Aplicação do Método dos Gases Traçadores para avaliar a taxa de renovação de ar em Bibliotecas do Polo II*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, 2011.

[19] *Indoor Air – Part 8: Determination of Local Mean Ages of air in Buildings for Characterizing Ventilation Conditions*, ISO 16000-8, 2007.

[20] Carneiro, B. C. L. *Avaliação dos sistemas de ventilação implementados em diferentes edifícios*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2015.

[21] ONSET Computer Corporation (https://www.onsetcomp.com/files/manual_pdfs/16210-H%20UX100-011%20Manual.pdf)

[22] ONSET Computer Corporation (https://www.onsetcomp.com/files/manual_pdfs/19198-J%20MX1102%20Manual.pdf)

[23] *Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution*, ASTM E 741, 2000.

[24] NP 1037-1: 2002; *Ventilação e evacuação dos produtos da combustão dos locais com aparelhos a gás*. Parte 1: Edifícios de habitação. Ventilação natural. Lisboa: IPQ

[25] *Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços, Requisitos de Ventilação e Qualidade do ar Interior* (RECS), Portaria n.º 353 – A/2013, 2013