

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO TÉRMICO E VENTILAÇÃO DE UM APARTAMENTO EM AMARANTE

DIAMANTINO FERNANDO CARVALHO AMARO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM
CONSTRUÇÕES**

Orientador: Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira

Coorientador: Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira
de Almeida

JUNHO DE 2021

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2020/2021

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



miec@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 Integrado em Engenharia Civil – 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.

À MINHA AVÓ

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho apenas foi possível com a colaboração e apoio de um conjunto de pessoas, e a todos aqueles que aqui se incluem manifesto o meu curto e sincero agradecimento.

À minha orientadora, Professora Doutora Eva Sofia Botelho Machado Barreira, pelo acompanhamento próximo, pela disponibilidade, pelos conhecimentos transmitidos e pela calma que sempre me conseguiu transmitir.

Ao meu coorientador, Professor Doutor Ricardo Manuel dos Santos Ferreira de Almeida, pela disponibilidade e resposta pronta no esclarecimento de dúvidas, pelo apoio na utilização dos mais diversos programas e pela sinceridade que sempre colocou nos seus comentários.

Ao Laboratório de Física das Construções da FEUP, à Prof.^a Eva Barreira, ao Prof. Ricardo Almeida e ao Eng. Eduardo Costa pela disponibilização do material e equipamento utilizado e por todos os esclarecimentos relativos ao seu funcionamento, onde se incluem os diferentes tipos de *software* utilizado.

Ao IPMA, na pessoa do Ricardo Deus, pela resposta pronta e clara, assim como pelo fornecimento de dados necessários à realização da dissertação.

À minha irmã Rita, dona e responsável pela habitação na qual se realizou este trabalho, pela disponibilização plena e pela calma e serenidade com que sempre encarou os diferentes ensaios e as suas respetivas imposições.

À minha madrinha, Sílvia, pelo apoio e condições que sempre me conseguiu proporcionar para que o meu estado de espírito se mantivesse sempre positivo.

A toda a minha família, pela educação e conhecimento que sempre me incutiram, base daquilo que hoje sou.

A todos os meus amigos, que sempre me souberam apoiar, aconselhar e animar nesta caminhada sem nunca exigir ou esperar qualquer tipo de retorno.

Obrigado a todos.

RESUMO

A importância da ventilação e do conforto térmico no normal desenrolar das atividades humanas tem vindo a aumentar, existindo cada vez mais reconhecimento da influência destas variáveis na saúde humana, física e psicologicamente. À medida que os materiais e equipamentos com influência nestas variáveis vão evoluindo, tanto a nível mecânico como estético, aumenta a exigência da sua resposta e a perspetiva das pessoas relativamente às condições de conforto térmico e qualidade do ar interior.

Assim sendo, neste trabalho, procurou-se caracterizar as condições de ventilação e conforto térmico de um apartamento, parte integrante de um edifício multifamiliar. Para caracterizar a ventilação da habitação idealizaram-se diferentes cenários, com condições da envolvente distintas, determinando-se para tal as respetivas taxas de renovação de ar através do método do gás traçador e da técnica do declive, de acordo com os procedimentos indicados na ASTM E741. Os cenários simulados permitiram comparar ritmos de ventilação para diferentes efeitos, como o da ação do vento, onde se inclui a ventilação cruzada, o efeito da exaustão mecânica na cozinha e o impacto da conduta de ventilação natural no quarto de banho. De modo a analisar o nível de conforto térmico na habitação recolheram-se em regime contínuo dados de temperatura do ar e humidade relativa de diferentes divisões, procedendo-se posteriormente à análise dos dados recolhidos pelo método gráfico da ASHRAE 55 e o método adaptativo da EN 15251.

Para ambas as variáveis em estudo foram obtidos valores aceitáveis para aquilo que devem ser as condições de conforto térmico e qualidade do ar interior. O nível de conforto térmico calculado através do método gráfico da ASHRAE 55 revelou-se parcialmente idêntico ao calculado pelo método adaptativo da EN 15251 para a categoria III, enquanto que de entre as análises por este último método adaptativo se concluiu que a exigência para a categoria II é significativa quando aplicada a edifícios existentes. Relativamente à ventilação da habitação os valores calculados são igualmente aceitáveis, com destaque para o efeito da ação do vento que induz taxas de ventilação do ar relativamente superiores na habitação. Quanto à conduta de ventilação natural existente no quarto de banho concluiu-se que esta não tem qualquer influência na renovação de ar das restantes divisões.

PALAVRAS CHAVE: Ventilação, Conforto Térmico, Taxa de Renovação Horária do Ar, Método do Gás Traçador, Técnica do Declive.

ABSTRACT

The importance of ventilation and thermal comfort in the normal unfolding of human activities has been increasing, existing more and more acknowledgement on the influence of these in human health, physically and psychologically. As materials and equipment with influence on these variables evolve, mechanically and aesthetically, increase the demand of their response and people perspective regarding thermal comfort and indoor air quality conditions.

In this job we tried to characterize the ventilation and thermal comfort conditions of the apartment, part of a multifamily building. To label de dwelling ventilation were idealized distinct scenarios with different surrounding conditions determining to do so the respective air renewal rates through the tracer gas method and the slope technique in accordance with the procedures indicated in the ASTM E 741. The simulated scenarios allowed to compare air change rates for different effects such as the wind action, where cross ventilation is included, the effect of mechanical exhaust in the kitchen and the impact of the natural exhaust duct in the bathroom. In order to analyze the level of thermal comfort in the dwelling, temperature and relative humidity data were collected continuously in different divisions, having proceeded later to the analysis of the collected data by using the ASHRAE 55 graphic method and the EN 15251 adaptive method.

For both variables under study, acceptable values were obtained for what should be the conditions of thermal comfort and indoor air quality. The thermal comfort level calculated using the graphic method of ASHRAE 55 was partially identical to that calculated by the adaptive method of EN 15251 for category III, while among the analyzes by this last adaptive method it was concluded that the requirement for category II is significant when applied to existing buildings. Regarding dwelling ventilation, the calculated values are equally acceptable, with emphasis on the wind action effect that induces relatively higher air ventilation in the dwelling. Concerning the natural ventilation duct existing in the bathroom, it was concluded that it has no influence on the air renewal in the remaining rooms.

KEYWORDS: Ventilation, Thermal Comfort, Air Change Rate, Tracer Gas Method, Decay Technique.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
NOMENCLATURA	XIII

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS	1

2. VENTILAÇÃO E CONFORTO TÉRMICO	3
2.1. DIFERENTES SISTEMAS DE VENTILAÇÃO	3
2.1.1. Ventilação Natural	3
2.1.2. Ventilação Mecânica	5
2.1.3. Ventilação Mista	6
2.1.4. Ventilação Inteligente	7
2.2. A IMPORTÂNCIA DA VENTILAÇÃO DOS EDIFÍCIOS	9
2.2.1. A Importância da Ventilação na Situação Pandémica	9
2.2.2. Efeito da Ventilação nos Ocupantes	10
2.2.3. Efeito da Ventilação no Edifício e nos Seus Componentes	13
2.3. TAXA DE RENOVAÇÃO DE AR E CONTROLO DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES	14
2.4. MÉTODO DO GÁS TRAÇADOR	15
2.5. CONFORTO TÉRMICO	18
2.6. MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO	19
2.6.1. Método Analítico: Índices PMV e PPD	19
2.6.2. Método Gráfico: ANSI/ASHRAE 55 (2013)	20
2.6.3. Método Adaptativo: EN 15251 (2007)	22

3. CASO DE ESTUDO	25
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	25
3.2. LOCALIZAÇÃO E CLIMA	25
3.3. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO	27

3.4. METODOLOGIA DE ENSAIO	29
3.4.1. Medição de Humidade e Temperatura	29
3.4.2. Medição de Concentração de CO ₂	30
3.5. ENSAIOS PRELIMINARES	34
3.5.1. Sensores de Temperatura e Humidade Relativa	34
3.5.2. SENSORES DE CONCENTRAÇÃO DE CO ₂	35
4. RESULTADOS E ANÁLISE DE ENSAIOS	39
4.1. CONFORTO TÉRMICO	39
4.1.1 Método Gráfico da ASHRAE 55	39
4.1.2 Método Adaptativo da EN 15251	43
4.1.3 Análise Comparativa (ASHRAE 55/ EN 15251)	46
4.2. VENTILAÇÃO	47
4.2.1 QUARTO I	47
4.2.2 Cozinha	52
5. CONCLUSÕES	55
5.1. CONCLUSÕES PRINCIPAIS	55
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Ventilação natural [1]	3
Figura 2 - Efeito de chaminé em climas opostos (adaptado de [4])	4
Figura 3 - Efeito da ação do vento num edifício (adaptado de [2])	4
Figura 4 - Ventilação mecânica [1]	5
Figura 5 - Ventilação natural e mista em edifícios [9]	6
Figura 6 - Exemplo esquemático de dois setores separados de ventilação numa habitação [3]	6
Figura 7 - Principais características da ventilação inteligente (adaptado de [10])	7
Figura 8 - Parâmetros aos quais a ventilação inteligente responde (adaptado de [10])	8
Figura 9 - Estrutura de construção inteligente da Deloitte [11]	9
Figura 10 - Distribuição do tempo de vida da população americana (adaptado de [13])	10
Figura 11 - Taxas de ventilação em residências e saúde (adaptado de [16])	11
Figura 12 - Concentração de CO ₂ nas habitações e saúde (adaptado de [16])	12
Figura 13 - Teor de humidade de equilíbrio versus humidade relativa para madeira sólida a 21°C (adaptado de [19])	13
Figura 14 – Correlação entre a concentração do gás poluente e a taxa de ventilação (adaptado de [7])	14
Figura 15 – Poluentes com origem no interior (adaptado de [7])	15
Figura 16 - Esquema da técnica de decaimento da concentração (adaptado de [7])	17
Figura 17 - Relação entre taxa de metabolismo e produção de CO ₂ (adaptado de [23])	17
Figura 18 - Distribuição percentual das trocas térmicas no corpo humano (adaptado de [15])	18
Figura 19 : Escala de sensibilidade térmica [32]	19
Figura 20 - Relação entre PPD E PMV, segundo o modelo de Fanger (adaptado de [31])	20
Figura 21 - Zona de conforto do método gráfico (adaptado de [30])	21
Figura 22 - Representação no diagrama de conforto da ASHRAE 55:2013 [22]	22
Figura 23 - Influência do tipo de edifício no cálculo da temperatura operativa [29]	23
Figura 24 - Conforto térmico à luz da EN 15251, na estação de aquecimento [37]	24
Figura 25 - Localização da habitação em estudo [38]	25
Figura 26 - Resumo meteorológico da cidade de Amarante para o ano de 2021 [40]	26
Figura 27 - Histórico simulado da temperatura média e humidade relativa do ar para a região do Tâmega e Sousa, 1971 a 2000 [41]	27
Figura 28 - Fachada principal do edifício (este)	28
Figura 29 - Planta da habitação em estudo e respetivas zonas de monitorização	28

Figura 30 - Termo higrômetros utilizados no caso de estudo (Hobbo U12-011 e Hobbo UX100-011)	30
Figura 31 - Software HOBOWare	30
Figura 32 - Dispositivos de medição da concentração de CO ₂ , Chauvin&Arnoux CA1510	31
Figura 33 - Extintor de CO ₂	31
Figura 34 - Método da ASTM E741 para cálculo da taxa de renovação do ar (técnica do declive)	32
Figura 35 - Ensaios preliminares: variação da temperatura.....	34
Figura 36 - Ensaios preliminares: variação da humidade relativa	34
Figura 37 - Ensaios preliminares: comparação de dispositivos de medição da concentração de CO ₂	36
Figura 38 - Ensaios preliminares: efeito da ocupação na concentração de CO ₂	38
Figura 39 - Ensaios preliminares: efeito da abertura e fecho de portas e janelas na concentração de CO ₂	38
Figura 40 - Método gráfico ASHRAE 55: Zonas	39
Figura 41 - Método ASHRAE 55: Gráficos	41
Figura 42 - Avaliação da percentagem de pontos em zona de conforto (dia/noite)	42
Figura 43 - Método adaptativo da EN15251: Gráficos para a categoria III	44
Figura 44 - Condições exteriores: Temperatura e humidade relativa	45
Figura 45 - Método adaptativo da EN15251: Comparação entre as categorias II e III	46
Figura 46 - Ventilação: Decaimento natural no quarto sem variantes (ASTM E741)	47
Figura 47 - Efeito da ação do vento na ventilação (aberturas exteriores na cozinha e no quarto 2) ...	48
Figura 48 - Grelha de exaustão de ar no quarto de banho 1	50
Figura 49 - Exaustor mecânico (cozinha)	51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Percepção da qualidade do ar interior (adaptado de [7])	12
Tabela 2 - Gases traçadores comuns e intervalos de deteção (adaptado de [7])	16
Tabela 3 - Especificações técnicas dos sensores de temperatura e humidade relativa utilizados	29
Tabela 4 - Especificação dos ensaios realizado no quarto 1.....	33
Tabela 5 - Especificação dos ensaios realizados na cozinha.....	33
Tabela 6 - Valores mínimos, máximos e médios de temperatura e humidade relativa no ensaio preliminar dos equipamentos	35
Tabela 7 - Ensaio preliminares: Valores mínimos, médios e máximos da concentração de CO ₂	36
Tabela 8 - Ensaio preliminares: influência da ocupação da habitação no cálculo da taxa de renovação do ar	37
Tabela 9 - Gráficos do método ASHRAE 55: limites por zona	40
Tabela 10 - Conforto térmico: Valores médios de temperatura e teor de humidade	41
Tabela 11 - Valores médios para a temperatura e teor de humidade (dia/noite)	43
Tabela 12 - Método adaptativo da EN15251: Análise aos pontos em situação de desconforto térmico por temperaturas baixas (Cat.III).....	44
Tabela 13 - Método Gráfico da ASHRAE 55 e Método Adaptativo da EN 15251 (% de conforto térmico)	47
Tabela 14 - Ventilação: Decaimento base sem variantes, DN1	48
Tabela 15 - Ventilação: Decaimento sob o efeito da ação do vento / abertura de portas e janelas (AV1, AV2 e AV3).....	49
Tabela 16 - Ventilação: Efeito da conduta de ventilação natural no quarto de banho 1	50
Tabela 17 - Ventilação: Efeito da exaustão mecânica na cozinha	51
Tabela 18 - Taxas de renovação do ar médias no Quarto 1 para os diferentes cenários.....	52
Tabela 19 - Ventilação de ar na cozinha (medição local)	53

NOMENCLATURA

SÍMBOLOS

C – Concentração de gás (CO_2)

C_{ex} – Concentração de gás (CO_2) no exterior

C_{in} – Concentração inicial de gás (CO_2) no interior

G – Produção interna de gás (CO_2)

HR – Humidade relativa

M – Taxa de metabolismo

p – Pressão atmosférica

P_s – Pressão de saturação do ar

P_w – Pressão de vapor de água no ar

Q – Caudal de ventilação

Q_{res} – Perdas de calor devidas à respiração

Q_{sk} – Perdas de calor através da pele

S – Carga térmica no corpo

t – Tempo

T – Temperatura

T_{RM}^n – Temperatura média exterior exponencialmente ponderada

T_o – Temperatura operativa

V – Volume

w – Humidade absoluta

W – Trabalho

Z – Altitude

ACRÓNIMOS E SIGLAS

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

ASTM - American Society for Testing and Materials

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

CDC – Centers for Disease Control and Prevention

CEN – European Committee for Standardization

CO_2 – Dióxido de Carbono

ECA – European Collaborative Action

EN – European Standard

ISO – International Organization for Standardization

NUTS – Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos

OMS – Organização Mundial da Saúde

PMV – Predicted Mean Value

PPD – Predicted Percentage of Dissatisfied

QAI – Qualidade do Ar Interior

REH – Regulamento dos Edifícios de Habitação

RPH – Renovações por Hora

SBS – Sick Building Syndrome

SCATs – Smart Controls and Thermal Comfort

WC – Quarto de Banho

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A ventilação dos espaços e a sua intrínseca conexão com os níveis de conforto térmico tem vindo a atingir patamares consecutivamente mais elevados de importância para o ser humano, ainda que as suas escolhas e decisões, como o investimento num imobiliário para habitação, não apresentem, por vezes, o nível de conhecimento necessário ou adequado acerca desta temática, baseando as respetivas escolhas em análises superficiais.

O norte de Portugal apresenta um clima caracterizado por períodos quentes e secos no verão, intensificando-se estas características com a distância ao litoral, com redução da intensidade dos ventos e do nível de humidade. Também no norte de Portugal o inverno é mais chuvoso e frio do que na generalidade das regiões mediterrâneas. Esta variedade climática, característica do norte e centro do país, assume particular importância quando se projetam os edifícios nestas zonas, assumindo então particular importância a ventilação dos espaços interiores para que se atinjam níveis adequados de conforto térmico, respeitando simultaneamente as normas e legislações em vigor.

Para satisfazer as necessidades de conforto térmico podem ser implementados diferentes tipos de sistema (ventilação natural, ventilação mecânica ou ventilação mista) variando as suas características de acordo com o modo como se processa a admissão e a extração de ar, no que se refere à relação com o exterior da habitação, mas também nos modos de circulação dos gases de compartimento para compartimento principalmente com a adoção de dispositivos de passagem de ar nas portas ou espaço para passagem da lâmina de ar na parte inferior, sem grande impacto visual.

Sendo esta uma matéria à qual se tem vindo a dedicar mais importância ao longo dos últimos anos, têm surgido diferentes perspetivas e propostas de sistemas de ventilação com outro tipo de particularidades associadas.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo desta dissertação consistiu na caracterização das condições de ventilação e conforto térmico de um apartamento integrante de um edifício multifamiliar em Amarante, Porto, num período primaveril. Foram efetuadas medições de temperatura, humidade relativa e concentração de CO₂, em diferentes compartimentos e ao longo do tempo, tendo-se em sincronia avaliado também o clima exterior ao longo do tempo. Para análise das condições de ventilação foram simulados diferentes cenários, a partir dos quais foram realizados os ensaios, enquanto que para a caracterização do conforto térmico foi efetuada uma medição em contínuo dos valores de temperatura e humidade relativa, para aplicação dos métodos

de análise utilizados. Com estes dados avaliou-se então o conforto térmico, aplicando os modelos definidos pela EN 15251 (2007) e pela ASHRAE 55 (2013). Através das medições da concentração de CO₂, e utilizando a técnica do gás traçador, foram determinadas as renovações por hora, em diferentes compartimentos, de acordo com as normas ASTM D6245 (2012), ASTM E741 (2000) e ISO 12569 (2000).

2

VENTILAÇÃO E CONFORTO TÉRMICO

2.1. DIFERENTES SISTEMAS DE VENTILAÇÃO

2.1.1. VENTILAÇÃO NATURAL

As necessidades de ventilação são tradicionalmente satisfeitas por meios de ventilação natural, em que o fluxo de ar é impulsionado pelo vento e pela temperatura. Esta renovação do ar interior deve realizar-se de forma controlada, com escoamento de ar entre aberturas de admissão de ar exterior, como janelas ou grelhas, e aberturas de extração de ar (Figura 1) [1] [2]. A falta de controlo é uma das grandes desvantagens associadas a este tipo de sistema, visto que diversas variáveis podem resultar em períodos de ventilação desadequada ou períodos de ventilação excessiva com elevadas perdas de calor.

Um design adequado das aberturas de admissão e extração de ar, bem como a utilização de sistemas de caixilharia apropriados à habitação, o ambiente em que a habitação está inserida e a respetiva dimensão e forma são parâmetros relevantes para potenciar a autonomia dos sistemas de ventilação natural, com maior controlo do fluxo de ar. Ainda assim, é bastante usual o ocupante ajustar as aberturas para ventilar o espaço de acordo com as respetivas necessidades. A abertura de janelas em fachadas opostas, pode potenciar a circulação de ar na habitação e, consequentemente, a renovação do ar interior, sendo que intensidades elevadas de renovação, com velocidades de circulação do ar mais altas, podem provocar vários problemas ao nível do conforto e, em situações mais graves, constituir um risco para a saúde dos ocupantes [3].

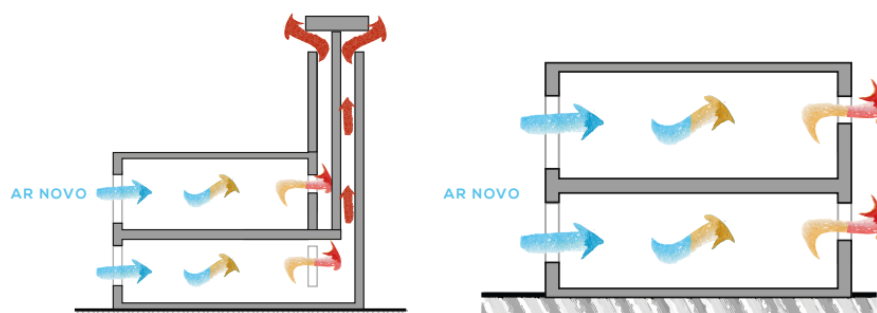


Figura 1 - Ventilação natural [1]

O deslocamento da massa de ar é provocado por diferenciais de pressão originados por fenómenos como o efeito chaminé ou o efeito da ação do vento. O efeito chaminé é provocado por diferenciais entre a temperatura interior e a temperatura exterior, em que o ar quente (menos denso) ascende relativamente ao ar frio. Ou seja, o ar interior, usualmente mais quente que o exterior, tende a sair pelas aberturas mais elevadas enquanto o ar mais frio (mais denso) entra pelas aberturas inferiores [3] [2]. Torna-se então perceptível que no verão poderão existir alguns entraves ao normal desenrolar deste efeito, visto que a temperatura do ambiente exterior pode igualar, ou até mesmo ser superior à temperatura interior, provocando a entrada de ar quente pelas aberturas superiores, com a saída do ar mais fresco pelas aberturas inferiores (Figura 2) [4].

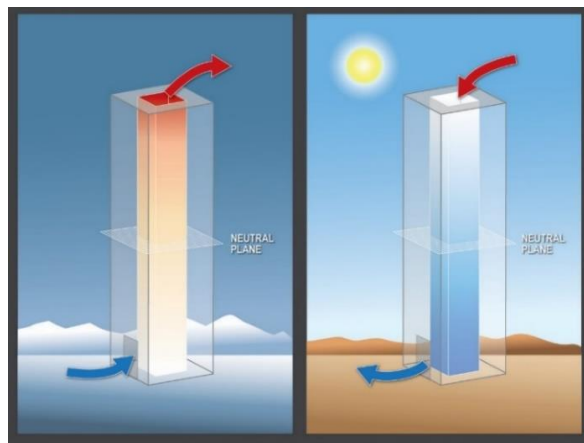


Figura 2 - Efeito de chaminé em climas opostos (adaptado de [4])

O efeito da ação do vento é um fator igualmente importante no dimensionamento de sistemas de ventilação natural, visto que o impacto do vento com uma dada velocidade potencia um campo de pressões positivas ou negativas, dependendo da direção do mesmo e da orientação das fachadas do edifício [5]. As pressões positivas ocorrem na perpendicular à direção do vento, ou seja, de frente para o mesmo, correspondendo a pontos de entrada de ar, enquanto que nas zonas de pressão negativa se localizam os pontos de saída do ar, como aberturas na fachada oposta ou na cobertura (Figura 3) [2]. Quanto maior a intensidade do vento e maiores as respetivas aberturas na fachada, mais ar passará por um determinado edifício.

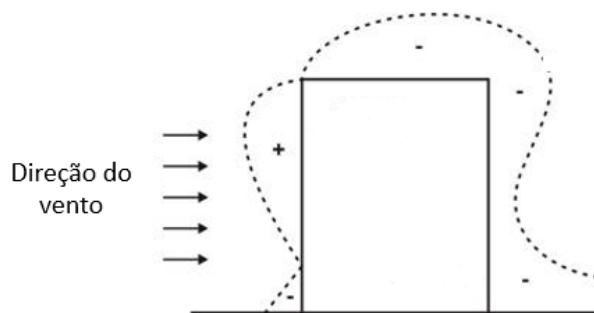


Figura 3 - Efeito da ação do vento num edifício (adaptado de [2])

Na maior parte das situações os dois efeitos (efeito chaminé e efeito da ação do vento) não ocorrem isoladamente, mas sim em conjunto. Por exemplo em edifícios altos, a elevada diferença de pressão entre o ar nos pisos superiores e no rés do chão induz altas velocidades do ar nos pisos inferiores, dificultando a abertura e o fecho das portas convencionais de dobradiças, sendo um dos motivos para a utilização de portas giratórias em edifícios de cota elevada.

2.1.2. VENTILAÇÃO MECÂNICA

A ventilação mecânica consiste na renovação do ar interior com recurso a dispositivos mecânicos (Figura 4), que garantem resposta de acordo com as necessidades dos ocupantes e da concentração de poluentes, independentemente do clima em que a habitação está inserida [1].



Figura 4 - Ventilação mecânica [1]

A utilização dos componentes mecânicos pode realizar-se de formas distintas [6]:

- Insuflação mecânica: a entrada de ar é forçada com recurso a um ventilador associado a uma rede de condutas. Esta entrada de ar aumenta a pressão no interior e impulsiona a saída do mesmo por janelas, grelhas e condutas de extração.
- Extração mecânica: a existência de uma rede de condutas associada a um dispositivo mecânico de extração de ar provoca uma depressão no interior, forçando a entrada de ar através de frinchas, janelas ou grelhas.
- Sistema balanceado: sistema que combina insuflação e extração mecânica, de forma a manter o interior do edifício em ligeira depressão. Isto permite a colocação de um sistema de recuperação de calor, com o ar extraído a ser utilizado para pré-aquecer o ar insuflado.

As vantagens da ventilação mecânica, relativamente à ventilação natural, passam pelo assegurar dos caudais necessários em regime contínuo, pela extração mais eficiente dos poluentes junto da fonte e ainda, como foi visto anteriormente, realizar o pré-aquecimento e a filtragem do ar insuflado [7].

As desvantagens da implementação deste tipo de sistema prendem-se com os custos associados para aquisição, operação e manutenção, o ruído provocado pelo respetivo funcionamento, constrangimentos à circulação de ar quando este se encontra desligado e ainda os possíveis problemas de saúde provocados pela falta de manutenção [7].

2.1.3. VENTILAÇÃO MISTA

O sistema de ventilação mista funciona como uma conjugação das características dos sistemas de ventilação natural e mecânica, sendo este o sistema mais característico dos edifícios de habitação em Portugal. Neste tipo de sistema o fluxo de ar é alcançado através da entrada de ar nos compartimentos principais (sala e quartos), dispersando este para as restantes divisões através das passagens de ar interiores (frinças nas portas ou grelhas) e acabando por ser extraído nos compartimentos de serviço (cozinhas e casas de banho) através de dispositivos de extração mecânica como o exaustor na cozinha e grelhas de extração nas casas de banho (Figura 5) [8] [6].

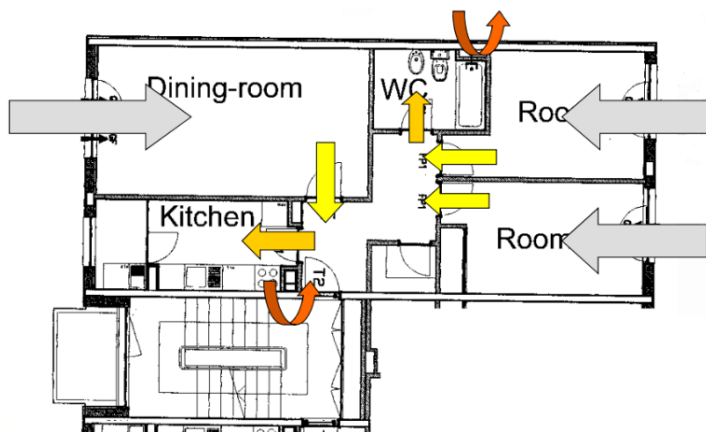


Figura 5 - Ventilação natural e mista em edifícios [9]

Este sistema tem a vantagem de exigir menos custos de instalação, operação e manutenção que um sistema completamente mecanizado, ainda que exista a desvantagem da possibilidade de ocorrência de inversões de fluxo nas condutas de extração natural, efeito este que pode ser contrariado com a colocação do ventilador estático no trecho final da conduta, na cobertura.

Existem casos particulares que exigem alguns cuidados como a existência de lareiras a céu aberto. Visto que a esta está associada uma conduta individual para exaustão de gases produzidos, numa situação de ventilação conjunta existe uma forte probabilidade de inversão de fluxo com consequências nefastas para o restante sistema. Nestas situações é recomendada a ventilação separada, isolando o espaço em que a lareira está inserida da restante habitação (Figura 6). As restantes recomendações a considerar podem ser consultadas na NP 1037-1 [3].

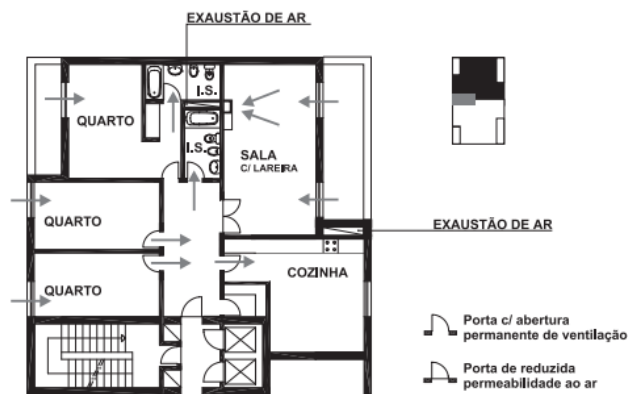


Figura 6 - Exemplo esquemático de dois setores separados de ventilação numa habitação [3]

2.1.4. VENTILAÇÃO INTELIGENTE

De acordo com o AIVC, *Air Infiltration and Ventilation Centre*, a ventilação inteligente consiste num processo em que continuamente se ajusta o sistema periodicamente, e opcionalmente por local, para providenciar a qualidade do ar interior desejada, minimizando simultaneamente o consumo de energia, as despesas com serviços públicos e outros problemas não relacionados com a qualidade do ar interior, como o desconforto térmico ou o ruído [10]. Este tipo de ventilação consiste num processo, não estando associado a um sistema específico (Figura 7).



Figura 7 - Principais características da ventilação inteligente (adaptado de [10])

O sistema de ventilação inteligente deve responder a fatores como a ocupação, condições de temperatura e qualidade do ar exteriores, necessidades da rede elétrica, deteção direta de contaminantes e funcionamento de outros sistemas de movimentação ou limpeza do ar (Figura 8). Adicionalmente este tipo de sistema pode fornecer informação aos proprietários dos edifícios, ocupantes e gestores sobre o consumo de energia e a qualidade do ar interior, bem como sinalizar quando os sistemas necessitam de manutenção ou reparação.

O período e a intensidade da ventilação podem ser adaptados para situações em que: a) a diferença de temperatura interior e exterior é mais baixa; b) as temperaturas internas e externas são adequadas para arrefecimento do espaço interior através da ventilação; c) a qualidade do ar exterior é aceitável. Além destes fatores o sistema de ventilação inteligente deve responder ao tipo de ocupação e às necessidades da rede elétrica, significando isto que poderá ser incluída a possibilidade de ajuste da taxa de ventilação dependendo da solicitação (reduzir a ventilação quando o edifício não está ocupado) e das necessidades de eletricidade, integrando-se nas estratégias de controlo da rede elétrica [10].



Figura 8 - Parâmetros aos quais a ventilação inteligente responde (adaptado de [10])

Este tipo de sistema também poderá constituir uma importante ferramenta de controlo de segurança, permitindo detetar, por exemplo através de sensores, variações desadequadas do fluxo de ar, da pressão do sistema ou da energia dos ventiladores, possibilitando que as falhas de sistema sejam detetadas previamente e reparadas com a maior brevidade possível, tendo-se, como exemplo, a substituição de filtros de aparelhos de AVAC.

A utilização de novas tecnologias da informação e de comunicação associadas à ventilação inteligente permite reduzir os impactos energéticos e melhorar globalmente a qualidade do ar interior, aspeto este amplamente relacionado com a definição e objetivos dos *smart buildings* (Figura 9), que correspondem a estruturas digitalmente interligadas que combinam edifícios otimizados e automação operacional com uma gestão inteligente do espaço para melhorar a experiência do utilizador, aumentar a produtividade, reduzir custos e amenizar riscos físicos e de cibersegurança [10].

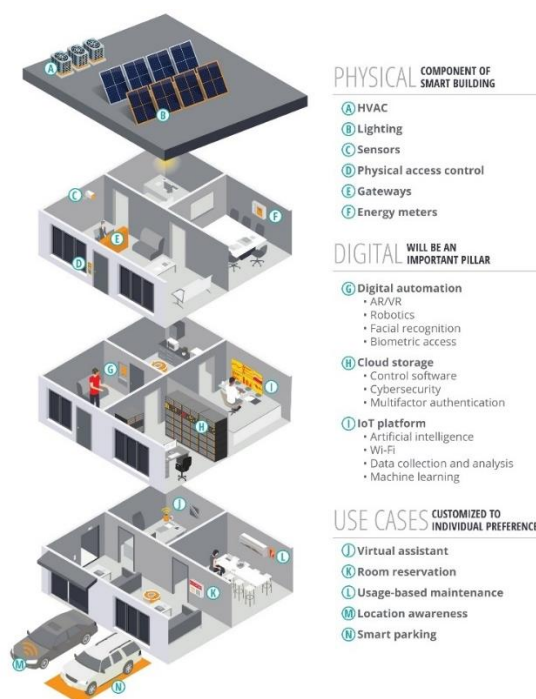


Figura 9 - Estrutura de construção inteligente da Deloitte [11]

2.2. A IMPORTÂNCIA DA VENTILAÇÃO DOS EDIFÍCIOS

2.2.1. A IMPORTÂNCIA DA VENTILAÇÃO NA SITUAÇÃO PANDÉMICA

A ventilação assume particular importância em períodos em que as pessoas acabam por despende a maior parte do seu tempo nas respetivas habitações, como o que resultou da situação pandémica do SARS-Cov2, que isolou grande parte da população em locais sem as características de ventilação adequadas para fazer face a tamanha concentração de poluentes ou contaminantes e para permitir níveis de conforto térmico favoráveis. Foram emitidas algumas recomendações pelo CDC, com a finalidade de dinamizar a entrada de ar fresco nas habitações e assim impedir a acumulação de partículas virais [12]:

- Abrir o máximo possível as portas e janelas, para permitir a entrada de ar fresco exterior. Apesar de ser preferencial abrir completamente, deixar as mesmas entreabertas pode ajudar;
- Abrir várias portas e janelas para potenciar uma maior movimentação de ar fresco no interior;
- Não abrir portas ou janelas se não for seguro para os habitantes ou outros (por exemplo, presença de crianças e animais, risco de queda, altos níveis de poluição exterior);
- Se abrir portas e janelas não for seguro considerar outras práticas para reduzir as partículas de vírus no ar, como a utilização de filtros de ar ou aparelhos de exaustão;
- Em habitações em que a operação dos dispositivos AVAC seja controlada por termostato, definir o ventilador para a posição “ligado” em vez de “automático”, o que irá fazer com que o ventilador opere continuamente, mesmo quando o aquecimento ou o ar condicionado não sejam necessários;
- Ajustar os sistemas AVAC para que estes aumentem o fluxo de ar nos espaços ocupados, sempre que possível.

2.2.2. EFEITO DA VENTILAÇÃO NOS OCUPANTES

A ventilação dos edifícios é responsável pela preservação da qualidade do ar interior bem como pela própria saúde e conforto dos seus ocupantes, que se estima que passem 85 a 90 % do seu tempo de vida dentro de portas (Figura 10) [13].

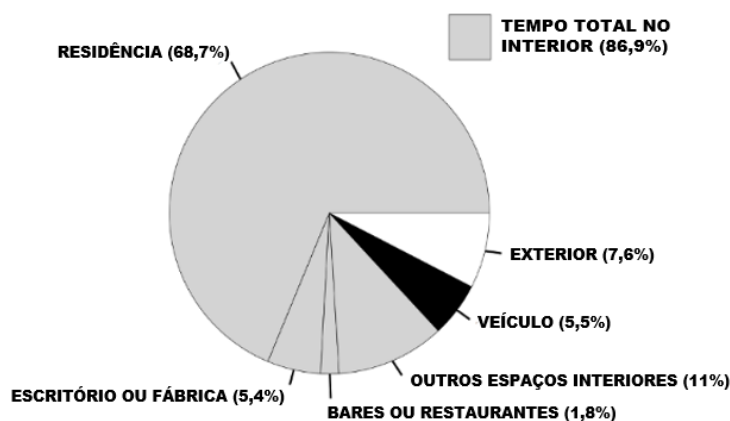


Figura 10 - Distribuição do tempo de vida da população americana (adaptado de [13])

A distinção entre conforto e saúde não é clara, não sendo explícito se os requisitos de conforto diminuem os riscos para a saúde e vice-versa. A OMS define saúde como o completo estado físico, mental e social de bem-estar e não apenas a ausência de doenças ou enfermidades [14]. O conforto ou bem-estar não tem uma definição concreta, sendo por isso subjetivo. Ainda assim o CDC associa a este termo características como a existência de emoções e estados de espírito positivos, como o contentamento ou felicidade, e a ausência de emoções negativas, como a ansiedade ou a depressão [12]. Resumidamente define-se como uma avaliação positiva da vida que permita a satisfação pessoal. A maior parte das diretrizes e recomendações de ventilação baseiam-se em requisitos de conforto térmico (EN 15251, 2007; ASHRAE, 2010; ECA, 1992) [15], o que eleva os padrões de avaliação, visto que a sensação de conforto é mais subjetiva e exigente que o ser apenas saudável.

Ao longo dos anos têm-se desenvolvido diversos estudos para retirar ilações acerca da possível influência da ventilação na saúde dos ocupantes de uma habitação, como por exemplo no que diz respeito a doenças como a asma (Bornehag et al., 2005; Clausen et al., 2011), alergia a ácaros do pó (Kovesi et al., 2009; Harving et al., 1994) ou estudo de sintomas SBS (Palonen et al., 2008; Ruotsalainen et al., 1991; Engvall et al., 2005).

Através da Figura 11, é possível avaliar o impacto das diferentes taxas de ventilação na saúde das pessoas, correspondendo as barras negras a situações em que o aumento da taxa de ventilação causou uma redução estatisticamente significativa nas consequências para a saúde, as barras brancas a situações em que não se verificou qualquer influência significativa e as barras cinza a estudos em que o aumento da taxa de ventilação provocou um aumento dos riscos para a saúde [16]. Portanto, taxas de ventilação mais elevadas relacionam-se com concentrações mais reduzidas de ácaros do pó e, consequentemente, menos riscos associados para a saúde, sendo este efeito significativo para uma larga escala de valores de taxa de renovação horária, desde cerca de $0,1 \text{ h}^{-1}$ até $1,4 \text{ h}^{-1}$. A função pulmonar aparentava melhor estado em locais com taxa de renovação horária abaixo de $0,5 \text{ h}^{-1}$, mas como os dados são referentes a um único estudo (Øie et al. 1999) não é sensato retirar ilações diretas baseadas

única e exclusivamente neste resultado. Relativamente aos casos de sintomas de asma e alergia apenas um dos estudos (Bornehag et al. 2005) revela que taxas de ventilação superiores reduzem o risco para a saúde, sendo que em dois dos estudos (Clausen et al. 2011; Emenius et al. 2004) não se observou nenhum efeito significativo (barras brancas).

Foram igualmente alvo de estudo os sintomas de SBS (Sick Building Syndrome – síndrome do edifício doente), como enxaquecas, problemas de concentração, astenia, irritação da pele ou da mucosa nasal, dos olhos e do trato respiratório superior [16]. Dos 3 estudos analisados, 2 (Palonen et al. 2008; Engvall et al. 2005) não revelaram qualquer variação, associada à taxa de ventilação, com efeito prejudicial relativo a este sintoma específico. Um estudo em específico (Ruotsalainen et al. 1991) revelou que a taxas de ventilação crescentes estava associado um agravamento de sintomas de SBS. A significância da amostra deste ensaio não permite retirar conclusões sustentadas acerca do impacto da ventilação no aparecimento de sintomas de SBS nos ocupantes.

Considerando apenas resultados associados a ensaios com efeitos significativos para a saúde devidos à taxa de ventilação, assume-se o valor mínimo de $0,4 \text{ h}^{-1}$ para que não exista qualquer risco para a saúde [16], valor que coincide com o mínimo regulamentado pelo governo português para edifícios de habitação (REH) [17].

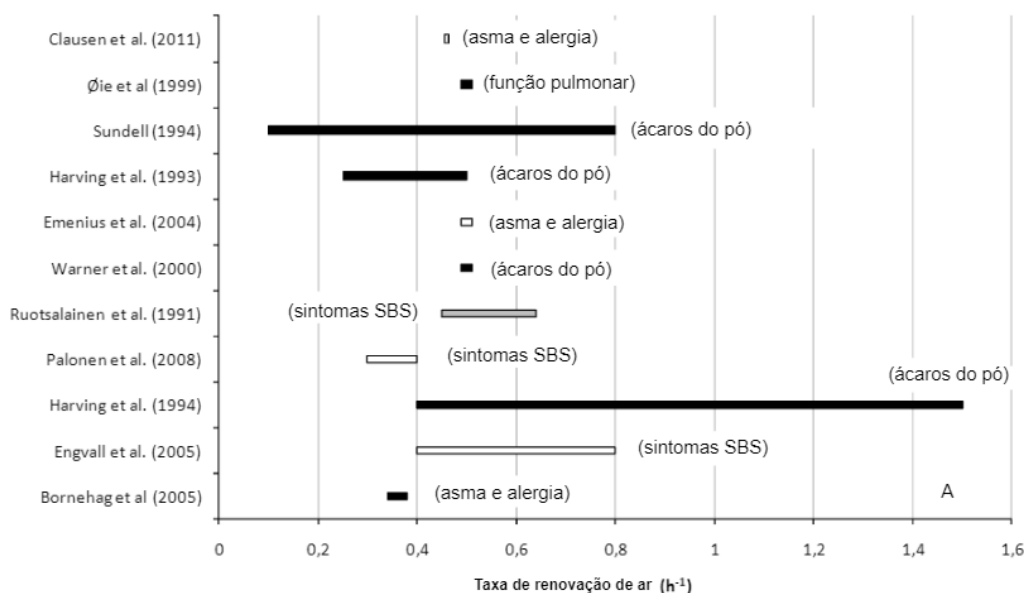


Figura 11 - Taxas de ventilação em residências e saúde (adaptado de [16])

Na Figura 12 são analisados diferentes estudos e a respetiva influência da concentração de dióxido de carbono no aparecimento dos sintomas de asma ou alergia e sintoma SBS, sendo que as barras negras simbolizam os estudos em que a redução do CO_2 (aumento da taxa de ventilação) causou uma redução estatisticamente significativa das consequências para a saúde [16]. A conclusão retirada é que baixos níveis de concentração de dióxido de carbono, reduzem significativamente os sintomas de asma, alergia e sintomas SBS. A concentração máxima de dióxido de carbono nas habitações, de forma a não existirem risco para a saúde ronda os 900 ppm [16].

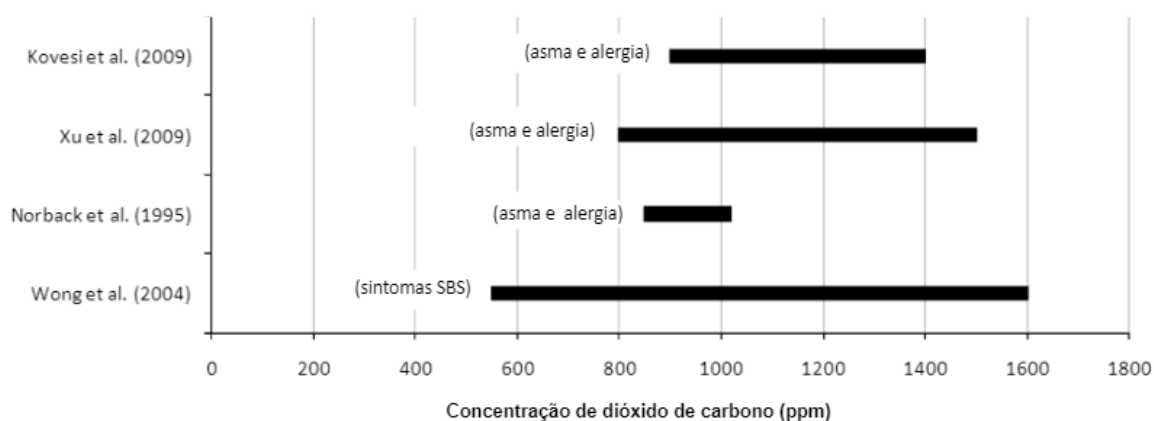


Figura 12 - Concentração de CO₂ nas habitações e saúde (adaptado de [16])

A existência de uma métrica poderia permitir identificar quando a qualidade do ar interior é desajustada, baseando-se nos seus efeitos na saúde humana e no conforto, considerando que as repercussões podem não ser imediatas. Um meio eficaz de apurar a existência de poluentes e consequente perda de qualidade do ar interior é o olfato. Geralmente a boa qualidade do ar interior é associada à não existência de cheiros e, não sendo possível determinar empiricamente a intensidade de um determinado odor, esta é avaliada com base no julgamento de um painel de visitantes [18]. As unidades principais associadas à análise de odores são os “Olf”, que correspondem à taxa de emissão de odores de uma pessoa padrão e o “decipol”, que corresponde à intensidade do odor ou à percepção da qualidade do ar, derivado de uma fonte de um “Olf”, ventilado por 10 L/s de ar fresco [18].

As análises efetuadas indicaram que a quantidade de visitantes de um espaço insatisfeitos com a intensidade de um odor está correlacionada com o valor do decipol ou seja, com a taxa de ventilação [7]. Como se pode observar na Tabela 1 quanto menor o valor do decipol, menor a percentagem de insatisfação, estando esta situação associada a taxas de renovação do ar mais elevadas. Esta abordagem pode funcionar como uma guia para a mitigação de odores que provocam desconforto.

Tabela 1 - Percepção da qualidade do ar interior (adaptado de [7])

Categoria	Percepção de qualidade do ar		Requerida
	% insatisfação	Decipol	Taxa de ventilação (L/S.Olf)
A	10	0,6	16
B	20	1,4	7
C	30	2,5	4

A forma mais eficaz de diminuir os riscos para a saúde provocados por contaminantes ou poluentes passa por atuar diretamente na origem do problema ou minimizar as emissões. Sendo estas medidas mais difíceis de implementar, opta-se preferencialmente pela disponibilização de ar exterior, supostamente limpo e suficiente para diminuir a concentração do poluente, ainda que nem sempre a melhor solução possa passar pelo aproveitamento do ar exterior, visto que a concentração de poluentes no exterior poderá ser elevada, como por exemplo em áreas altamente urbanizadas ou centros cosmopolitas.

2.2.3. EFEITO DA VENTILAÇÃO NO EDIFÍCIO E NOS SEUS COMPONENTES

A ventilação deficiente, associada a outras variáveis como o isolamento das paredes, tipo de cobertura, zona climática ou número de ocupantes, pode ter consequências nefastas para o edifício e os seus componentes. Esta relação da ventilação com o edifício não é uma relação direta de causa-efeito, funcionando mais como uma espécie de causa-efeito-reação, visto que taxas de ventilação provocam o agravamento de situações que danificam a estrutura do edifício e dos respetivos componentes. Por exemplo taxas de ventilação mais baixas potenciam níveis de humidade mais elevados, o aparecimento de fungos e de ácaros que podem danificar os materiais que constituem os elementos construtivos, mas também mobiliário e tecidos.

Além do efeito nefasto em elementos estruturais como o betão, taxas de ventilação reduzidas podem levar a condições favoráveis para o aparecimento de fungos na parte interior das paredes da habitação, que para além do próprio impacto visual poderá também ser prejudicial para a saúde dos moradores. Estas condições de humidade excessiva, inclusive com aparecimento de manchas, contribuem para a própria degradação da mobília e caixilharias existentes na habitação visto que grande parte destes são de madeira. A quantidade de humidade na madeira atingirá sempre um estado de equilíbrio com a humidade relativa do ar circundante, correspondendo ao teor de humidade de equilíbrio da madeira (*equilibrium moisture content*) [19]. Esta relação é ilustrada pela curva da Figura 13, em que cada valor de teor de humidade de equilíbrio é função da humidade relativa. Deste modo, esta curva pode ser usada para prever o teor de humidade da madeira em serviço para qualquer valor de humidade relativa do ambiente circundante. Por exemplo, a madeira inserida num ambiente de humidade relativa pouco acima dos 40 % eventualmente atingirá um teor de humidade de equilíbrio na madeira de 8% (Figura 13) [19].

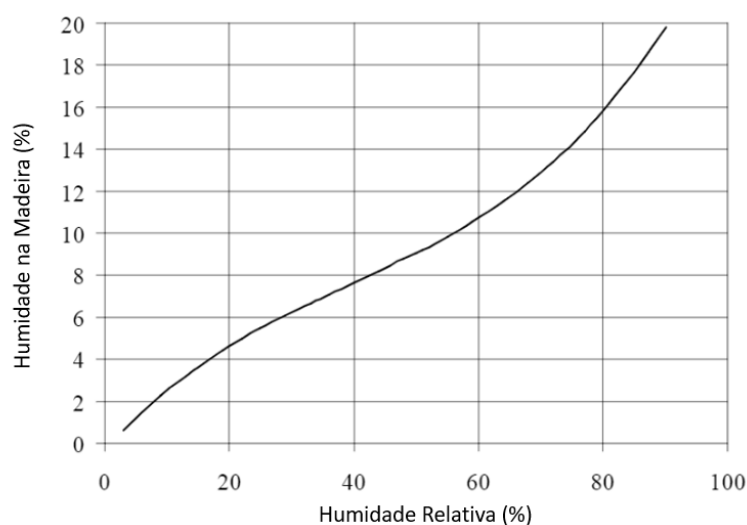


Figura 13 - Teor de humidade de equilíbrio versus humidade relativa para madeira sólida a 21°C (adaptado de [19])

2.3. TAXA DE RENOVAÇÃO DE AR E CONTROLO DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES

A taxa de renovação de ar necessária num determinado espaço depende não só da quantidade do poluente presente, mas também da própria natureza do mesmo. Em situações em que poluentes idênticos são emitidos por mais que uma fonte, como é o caso do dióxido de carbono, a ventilação deve basear-se na emissão total por todas as fontes. Na Figura 14 é claro o impacto da taxa de renovação horária na concentração de poluentes, sendo que a redução mais brusca no gás poluente se dá no intervalo inicial da taxa de renovação do ar, existindo uma redução menos acentuada a partir dos valores mais reduzidos da concentração do poluente, visto que o declive da reta tangente à curva de concentração se vai apresentando cada vez menos acentuado.

Para determinar a taxa de renovação de ar necessária, é comum identificar a fonte de poluição dominante, que no caso de edifícios de habitação é, previsivelmente, o ser humano. Assim, o valor mínimo aceitável será sempre o necessário para diluir o poluente dominante a um nível aceitável de concentração, garantindo-se sempre um mínimo de $0,4 \text{ h}^{-1}$ em toda a habitação, ainda que sejam aconselháveis valores na ordem $0,7$ ou $0,8 \text{ h}^{-1}$ [20].

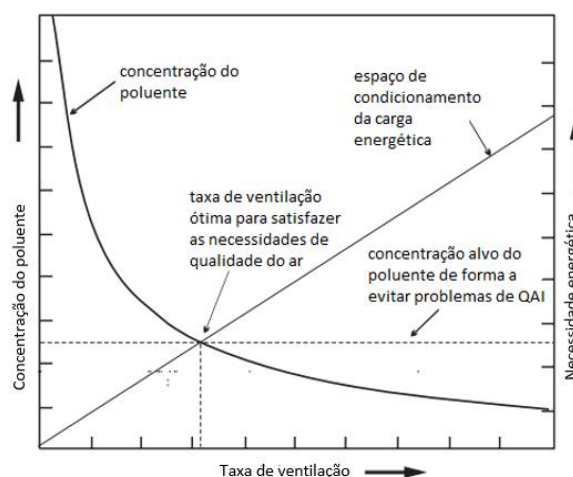


Figura 14 – Correlação entre a concentração do gás poluente e a taxa de ventilação (adaptado de [7])

Poluentes de fontes devidamente identificadas e localizadas devem ser contidos e extraídos no ponto onde ocorre a própria contaminação do ar, para evitar contaminação de outros espaços ou divisões, que é exatamente o que acontece usualmente nas cozinhas com a utilização de exaustores [21]. Globalmente podem destacar-se as seguintes fontes de poluição do ar interior [1]:

- Equipamento: mobiliário, sistemas de ventilação e/ou ar condicionado mal conservados, caldeiras ou fogões mal conservados e sem extração adequada dos produtos de combustão, humidade originária de máquinas de lavar e secar, lixo, chaminé obstruída (Figura 15);
- Atividades humanas: emissões a partir de produtos de bricolage, produtos da casa de banho e de limpeza, aspirador, fragâncias para a casa (velas ou incenso), preparação de comida e fumo do tabaco (Figura 15);
- Ocupação dos locais: plantas (fertilizantes e pesticidas), metabolismo humano e animais;
- Solo: emissões de gases (radão) ou solos contaminados;
- Materiais de construção e decoração: pinturas, vernizes, colas, isolamentos e revestimento de pisos, paredes e tetos;
- Ar exterior: tráfego rodoviário, atividades industriais ou agrícolas, queima de lenha e outros poluentes.

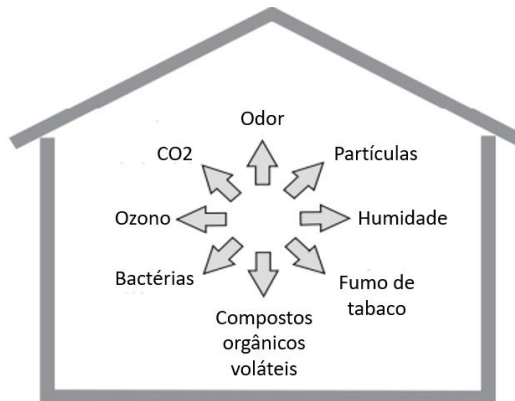


Figura 15 – Poluentes com origem no interior (adaptado de [7])

As fontes de poluição exteriores devem ser controladas e devidamente atenuadas através de diferentes medidas [7]:

- Filtração: utilizada principalmente para remover partículas do ar em dispositivos de ventilação mecânica;
- Localização das entradas de ar: devem situar-se à devida distância das fontes de poluição;
- Amortecedores de ar fresco com controlo da qualidade do ar: os picos de poluição exterior normalmente ocorrem nos períodos da manhã e do fim da tarde, sendo que a qualidade do ar interior poderá ser melhorada fechando as entradas de ar ou as janelas;
- Estanqueidade do edifício: o edifício deve estar devidamente isolado do ambiente exterior de forma a impedir a entrada de contaminantes através de infiltrações de ar.

As fontes interiores de poluição podem ser controladas dos seguintes modos [7]:

- Controlo na fonte das emissões evitáveis (compostos orgânicos voláteis, formaldeído de móveis, fumo de tabaco, etc.);
- Contenção e ventilação na fonte para poluentes gerados por atividades de ocupação (cozinhar, lavagem e secagem de roupa, utilização de equipamento de escritório);
- Ventilação de diluição e deslocamento para emissões de fontes inevitáveis (poluição metabólica primária).

2.4. MÉTODO DO GÁS TRAÇADOR

O método do gás traçador permite retirar conclusões acerca das taxas de renovação de ar em edifícios, nas mais diversas situações de ventilação. A técnica baseia-se na dispersão de um gás inerte (Tabela 2), sem efeitos prejudiciais para a saúde dos ocupantes, num espaço onde a concentração do mesmo gás é observada, registada e analisada. Dependendo da aplicação, o método pode basear-se numa das seguintes técnicas:

- Técnica do declive;
- Técnica da fonte;
- Técnica da concentração constante;
- Técnica da emissão constante;
- Técnica da emissão constante com emissão e recolha passiva;
- Técnica da emissão pulsada.

Tabela 2 - Gases traçadores comuns e intervalos de deteção (adaptado de [7])

Gás traçador	Concentração máxima aceitável	Peso molecular	Concentração mínima detetável	Método de deteção
Dióxido de carbono	5000 ppm	44	400 ppm	infravermelhos
Óxido nitroso	25 ppm	44	0.1 ppm	infravermelhos
Hexafluoreto de enxofre	1000 ppm	146	0.1 ppm 1.0 ppb	infravermelhos captura de eletrões
Traçadores de flúor	-	200 - 400	0.001 ppb	captura de eletrões

* atualmente a utilização do hexafluoreto de enxofre como gás traçador não é permitida, devido à contribuição deste gás para o efeito de estufa

No âmbito deste trabalho, a técnica implementada foi a técnica do declive, utilizando o dióxido de carbono (CO₂) como gás traçador, de acordo com as normas ISO 12569 e ASTM E741. Deste modo a variação temporal da concentração de um gás pode ser calculada do seguinte modo [22]:

$$V \times \frac{dC(t)}{dt} = G + Q \times C_{ex} - Q \times C(t) \quad (2.1)$$

em que V representa o volume (m³), $C(t)$ a concentração do gás (ppm), t o tempo (s), G a produção interna do gás (cm³/s), Q o caudal de ventilação (m³/h.) e C_{ex} a concentração do gás no exterior (ppm).

Por integração obtém-se a solução:

$$C(t) = C_{ex} + \frac{G}{Q} + \left(C_{in} - C_{ex} - \frac{G}{Q} \right) \times e^{-\frac{Q}{V} \times t} \quad (2.2)$$

em que C_{in} corresponde à concentração inicial de gás no interior (ppm).

A partir da equação 2.2 e assumindo concentrações aproximadamente nulas do gás traçador no ar exterior, despreza-se a parcela referente ao ar exterior:

$$C(t) = \frac{G}{Q} + \left(C_{in} - \frac{G}{Q} \right) \times e^{-\frac{Q}{V} \times t} \quad (2.3)$$

Assumindo que a área analisada se encontra desocupada, não havendo produção interna do gás traçador chega-se à equação:

$$C(t) = C_{in} \times e^{-\frac{Q}{V} \times t} \quad (2.4)$$

Ou,

$$\frac{Q}{V} = RPH = \frac{\ln\left(\frac{C_{in}}{C(t)}\right)}{t} \quad (2.5)$$

em que RPH são as renovações horárias (h⁻¹).

Os diferentes valores da concentração ao longo da fase de decaimento obtidos para um determinado intervalo de tempo permitem elaborar a curva de decaimento (Figura 16).

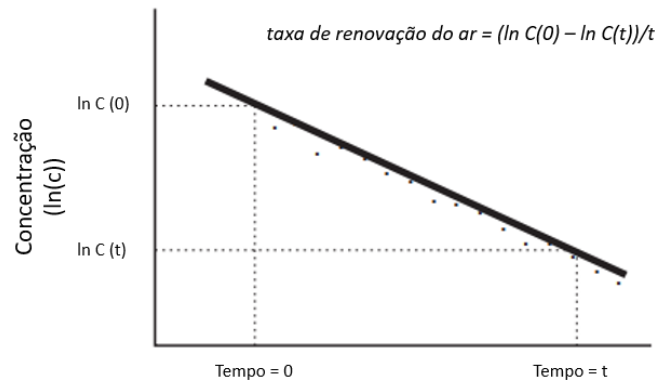


Figura 16 - Esquema da técnica de decaimento da concentração (adaptado de [7])

No caso da utilização do CO_2 como gás traçador a concentração inicial (pré-decaimento) pode atingir-se com recurso ao gás produzido pelo metabolismo dos ocupantes do espaço no normal desenrolar das suas atividades. Assim sendo as diretrizes da metodologia presente na ASTM E741 devem ser adaptadas a esta situação específica com procedimentos específicos expressos na norma ASTM D6245. Contrariamente ao que foi referido anteriormente (equação 2.3), a concentração de CO_2 na atmosfera não é nula ou desprezável, sendo importante para esta situação que a concentração do gás no exterior se mantenha constante no decorrer do ensaio, substituindo-se então a concentração interior referida na ASTM E741 pela diferença entre as concentrações interior e exterior [22]. Prevendo este método que não se gera mais gás traçador após o início do ensaio, é fulcral que os ocupantes do espaço o abandonem antes do mesmo, visto que o ser humano produz continuamente dióxido de carbono, em função do metabolismo de cada pessoa, existindo um certo padrão associado à intensidade da atividade dos ocupantes, sendo que quanto mais intensa esta for maior será a produção de dióxido de carbono (Figura 17) [23].

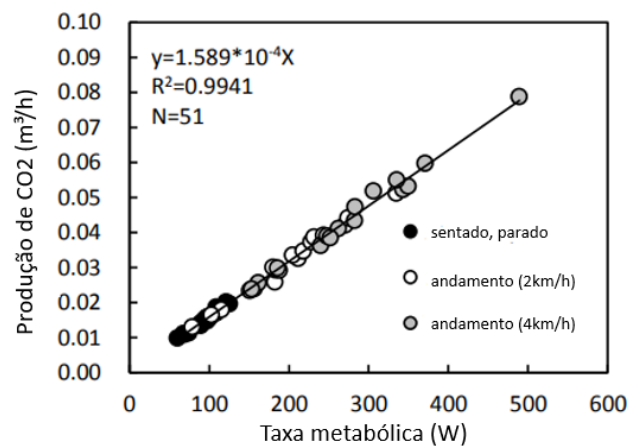


Figura 17 - Relação entre taxa de metabolismo e produção de CO_2 (adaptado de [23])

2.5. CONFORTO TÉRMICO

A ASHRAE define o conforto térmico como a condição da mente em que se expressa a satisfação com o ambiente térmico em que se está inserido [24]. Tratando-se de um estado de espírito e não uma condição de estado, o conforto térmico assume-se como um processo cognitivo que envolve diversos fatores físicos, fisiológicos ou psicológicos [25]. No geral, este tipo de conforto sente-se quando a temperatura corporal se mantém num intervalo estreito, a humidade da pele é baixa e o esforço fisiológico de regularização é mínimo. Uma situação de desconforto térmico acontece, por exemplo, quando a temperatura ambiente é superior à temperatura corporal, não permitindo a dissipação do calor do corpo para o ambiente.

A percepção de conforto ou desconforto térmico varia de pessoa para pessoa, estando dependentes de alguns fatores [26]:

- Atividade;
- Vestuário;
- Temperatura do ar;
- Humidade relativa do ar;
- Temperatura média radiante;
- Velocidade do ar.

Para se adaptar, em situações de desconforto térmico, o corpo humano apresenta mecanismos de autorregulação da temperatura interior, que se adaptam à circunstância e ao ambiente em que este está inserido. Em situações de ambientes mais extremos, em que o corpo humano efetua trocas energéticas com intensidade superior existem os seguintes mecanismos de autorregulação [27]:

- Hipotermia: aumento da taxa metabólica, arrepios, tiritar e vasoconstrição.
- Hipertermia: suor, vasodilatação, outros.

As trocas energéticas do corpo humano que potenciam estes mecanismos de regulação podem dar-se através de evaporação, convecção ou radiação (Figura 18) [15].

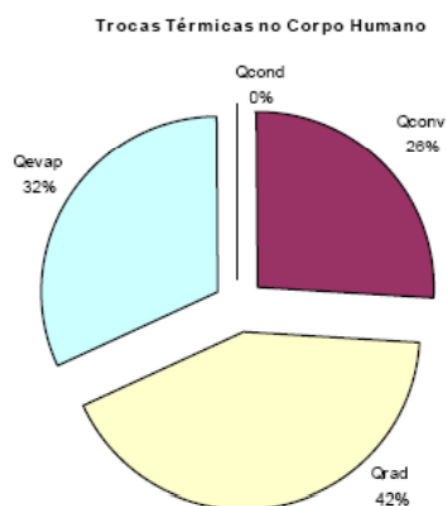


Figura 18 - Distribuição percentual das trocas térmicas no corpo humano (adaptado de [15])

Existem diversas normas na área do conforto térmico, desenvolvidas pela ISO (*International Organization for Standardization*), ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) e, mais recentemente, pelo CEN (*European Committee for Standardization*) [28], destacando-se a negrito as que foram utilizadas neste trabalho:

- ISO 10551 (1995): Ergonomias de ambientes térmicos – Verificação da influência do ambiente térmico usando escalas subjetivas e julgamento;
- ISO 7726 (1998): Ambientes térmicos – Instrumentos e métodos para medição de parâmetros físicos;
- ISO 8996 (2004): Ergonomia – Determinação da taxa de calor metabólico;
- ISO 7730 (2005): Ambientes térmicos moderados – Determinação dos índices PMV e PPD e especificações das condições para conforto
- ISO 9920 (2007): Ergonomia de ambientes térmicos – Estimativa do isolamento térmico e resistência evaporativa de uma indumentária;
- **EN 15251 (2007)** [29]: Parâmetros ambientais interiores para projeto e avaliação do desempenho energético de edifícios abordando a qualidade do ar, ambiente térmico, iluminação e acústica.
- **ANSI/ASHRAE Standard 55 (2013)** [30]: Ambientes térmicos – Condições para ocupação humana;

2.6. MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO

2.6.1. MÉTODO ANALÍTICO: ÍNDICES PMV E PPD

Para avaliar as diferentes sensações é importante a existência de índices de conforto térmico como o PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied – percentagem prevista de insatisfeitos) e o PMV (Predicted Mean Vote – voto médio previsto), sendo estes considerados métodos de cálculo analíticos, presente em normas como a ISO 7730 ou EN 15251.

O índice PMV baseia-se na equação de equilíbrio de calor, onde se assume que o conforto térmico corresponde a uma taxa de carga térmica no corpo [28]:

$$S = (M - W) - (Q_{sk} + Q_{res}) [W/m^2] \quad (2.6)$$

em que S corresponde à carga térmica no corpo (W/m^2), $(M-W)$ à produção de calor metabólico (W/m^2), Q_{sk} às perdas de calor através da pele (W/m^2) e Q_{res} às perdas de calor devidas à respiração (W/m^2).

Fanger propôs igualmente uma escala de sensibilidade térmica (Figura 19) que transmite o grau de desconforto associado às diferentes condições ambientais e variáveis pessoais, testadas em câmaras climáticas [31].

Muito quente	3
Quente	2
Ligeiramente quente	1
Neutro	0
Ligeiramente frio	-1
Frio	-2
Muito frio	-3

Figura 19 : Escala de sensibilidade térmica [32]

Através da relação entre a sensação térmica experimentada por um grupo de indivíduos em ambientes controlados e a equação de equilíbrio (Equação 2.6), Fanger propõe o cálculo do índice PMV através da seguinte expressão [28]:

$$PMV = (0,303 \times e^{-0,036M} + 0,028) \times S \quad (2.7)$$

Fanger propôs ainda o indicador PPD, baseado no indicador PMV calculado através da equação 2.7 [28]:

$$PPD = 100 - 95 \times e^{-(0,03353PMV^4 + 0,2179PMV^2)} \quad (2.8)$$

A análise da relação entre os dois índices (Figura 20) permite concluir que as temperaturas extremas provocam sensações distintas, mas com níveis de desconforto idênticos, visto que para sensações de frio e quente a percentagem prevista de insatisfeitos ronda os 80 %, em ambas as circunstâncias. É perceptível que não existe uma situação de satisfação total, ou seja, não existe uma zona da curva com ordenada de 0%, visto que o mínimo absoluto é cerca de 5%. Este valor é então o ponto para o qual se prevê uma menor insatisfação com as condições ambiente, correspondendo a uma situação de neutralidade térmica, em que não se sente frio nem calor. O valor recomendado pela norma ISO 7730 (estabelece condições para ambientes moderados do ponto de vista térmico e nos quais as pessoas desenvolvam atividades leves) para o valor de PMV situa-se entre os -0,5 e os +0,5, associado a um PPD que deverá ser inferior a 10% [33].

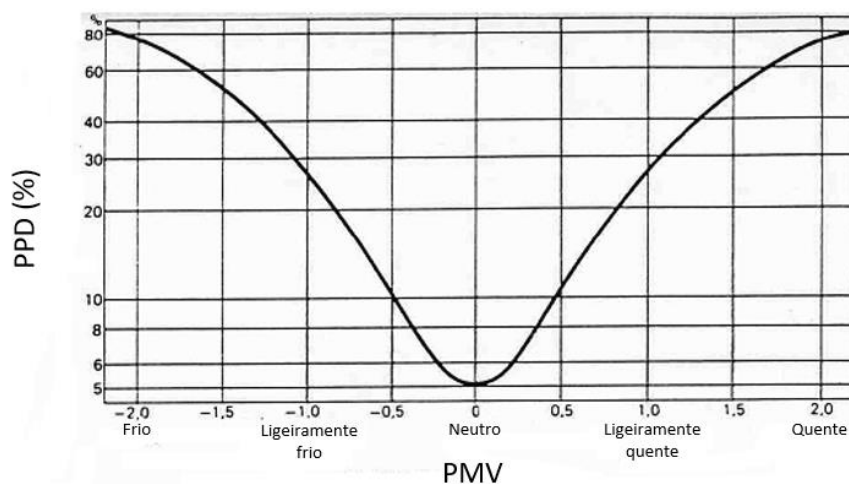


Figura 20 - Relação entre PPD E PMV, segundo o modelo de Fanger (adaptado de [31])

2.6.2. MÉTODO GRÁFICO: ANSI/ASHRAE 55 (2013)

A determinação da zona de conforto através da ANSI/ASHRAE 55 (2013) [30] considera a existência de dois períodos anuais distintos: a estação de aquecimento (Inverno) e a estação de arrefecimento (Verão), sendo que a sua aplicabilidade está limitada a um número representativo de ocupantes com taxas metabólicas entre os 1,0 e os 1,3 met e roupas com isolamento (I_{cl}) entre 0,5 e 1,0 clo [30], valores estes associados a Verão e Inverno, respetivamente, com os seus limites destacados na Figura 21 a vermelho e azul. A zona de conforto térmico associada a este método é limitada a valores de humidade absoluta iguais ou inferiores a $0,012 \text{ kg} \cdot \frac{\text{H}_2\text{O}}{\text{kg}}$ de ar seco e velocidades do ar inferiores a 0,2 m/s [30].

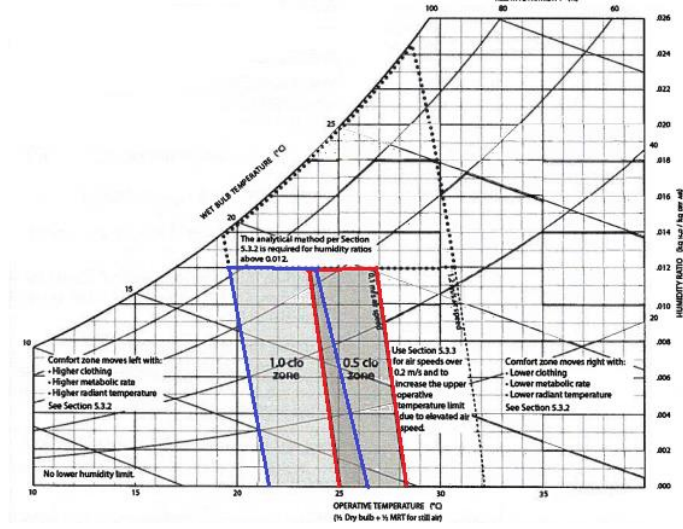


Figura 21 - Zona de conforto do método gráfico (adaptado de [30])

Com medições efetuadas através de sensores de temperatura e humidade relativa é possível calcular os valores da temperatura operativa e da humidade absoluta dos diferentes espaços analisados, o que conjugado com a zona delimitada de conforto térmico, permite retirar conclusões acerca do nível de conforto dos respetivos espaços [22]. O valor da temperatura operativa é, para o presente trabalho, considerado idêntico ao da temperatura do ar no local de medição, considerando nulos os efeitos da temperatura média radiante e do velocidade do ar, enquanto que a humidade absoluta é calculada através dos fundamentos da psicometria [34]:

$$P_s(T) = 610,5 \times e^{\frac{17,269 \times T}{237,3 + T}} \text{ [Pa]}, \text{ para } T \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.9)$$

e,

$$P_w = \frac{HR}{100} \times P_s(T) \text{ [Pa]} \quad (2.10)$$

em que P_s corresponde à pressão de saturação do ar (Pa), T à temperatura ($^\circ\text{C}$), HR à humidade relativa do espaço (%) e P_w à pressão de vapor de água do ar (Pa).

Para efetuar o cálculo da humidade absoluta (w) é necessário proceder ao cálculo da pressão atmosférica, em função da altitude (Z , em metros) do local analisado [30], calculando-se de seguida o valor da humidade absoluta:

$$p = 101325 \times (1 - 2,25577 \times 10^{-5} \times Z)^{5,2559} \text{ [Pa]} \quad (2.11)$$

e,

$$w = 0,621945 \times \frac{P_w}{p - P_w} \text{ [kg/kg]} \quad (2.12)$$

Com os valores da humidade absoluta e da temperatura operativa, que como já foi referido se considera igual à da temperatura do ar, é possível preencher o diagrama da ASHRAE 55 com os pontos calculados (Figura 22). Quanto maior for a incidência de pontos exteriores à zona de conforto, maior será o nível de desconforto do espaço analisado.

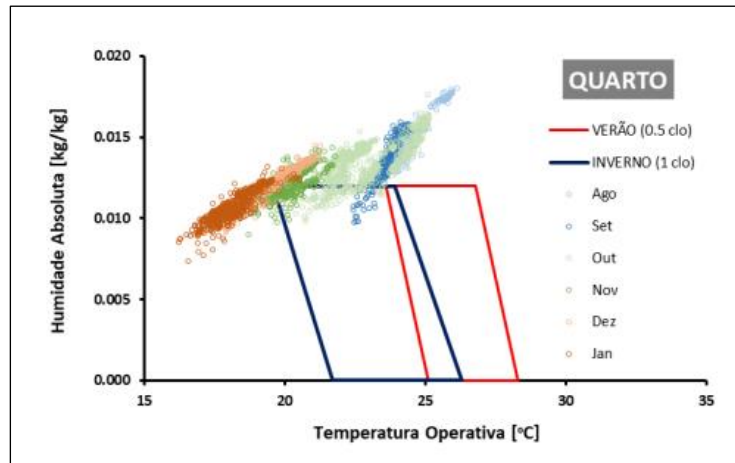


Figura 22 - Representação no diagrama de conforto da ASHRAE 55:2013 [22]

2.6.3. MÉTODO ADAPTATIVO: EN 15251 (2007)

A metodologia adaptativa tem esta denominação porque tem em consideração o comportamento dos utilizadores que, não sendo agentes passivos relativamente às condições térmicas proporcionadas pelos edifícios que ocupam, promovem ações que garantam uma sensação térmica de conforto [35]. Estas atitudes baseiam-se no abrir e fechar de vãos envidraçados, no controlo dos equipamentos de climatização e em mecanismos de sombreamento, entre outros, sendo estas ações fundamentadas pelas respetivas sensações térmicas do indivíduo, resultado de parâmetros fisiológicos e psicológicos [36].

Na EN 15251 (2007) [29] são definidos parâmetros ambientais interiores para projeto e avaliação do desempenho energético de edifícios abordando a qualidade do ar, ambiente térmico, iluminação e acústica. Esta norma indica duas metodologias distintas, uma que recorre aos índices PMV e PPD (analítica) e outra que faz uso de um modelo adaptativo resultante do projeto de investigação europeu SCATs (*Smart Controls and Thermal Comfort*) [29].

Para o presente trabalho, tal como no método gráfico da ASHRAE 55 abordado no capítulo anterior, considera-se a temperatura operativa igual à temperatura do ar, não sendo considerados os efeitos da velocidade do ar e da temperatura média radiante. O clima exterior é caracterizado pela temperatura média exterior ponderada (T_{RM}^n), calculada através das temperaturas médias diárias da semana precedente (equação 2.14). Esta utilização da temperatura média exterior ponderada tem implícito que o tempo necessário para que um indivíduo se ajuste completamente às alterações do clima exterior é, aproximadamente, uma semana [37].

$$T_{RM}^n = \frac{(T_{n-1} + 0,8 \times T_{n-2} + 0,6 \times T_{n-3} + 0,5 \times T_{n-4} + 0,4 \times T_{n-5} + 0,3 \times T_{n-6} + 0,2 \times T_{n-7})}{3,8} [^{\circ}\text{C}] \quad (2.14)$$

São estabelecidas quatro categorias de conforto [29], em função da expectativa dos utilizadores, sendo que, quanto mais elevada a categoria maior o intervalo de conforto, acontecendo isto devido a uma menor expectativa, traduzida numa maior tolerância dos utilizadores (Figura 23). Nesta figura não é apresentado qualquer limite para a categoria IV, o que se deve ao facto desta categoria apenas se aplicar a valores fora dos critérios associados às restantes 3 categorias, ao que acresce o facto de esta categoria IV apenas ser aceitável para um determinado período do ano.

Para o caso de estudo desta dissertação interessa fazer especial referência às categorias II e III. Na categoria II estão incluídos os edifícios de habitação novos ou renovados, aos quais está associado um nível normal de expectativa, e cujos limites superior e inferior se baseiam nas equações 2.15 e 2.16, respetivamente, aplicáveis em situações em que a temperatura média exterior exponencialmente ponderada esteja entre os 10 e os 30 °C para o limite superior, e para o intervalo entre os 15 e os 30 °C para o limite inferior.

$$\text{Limite superior: } T_o = 0,33 \times T_{RM}^n + 18,8 + 3 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.15)$$

$$\text{Limite inferior: } T_o = 0,33 \times T_{RM}^n + 18,8 - 3 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.16)$$

Na categoria III incluem-se os edifícios existentes, com um nível moderado e aceitável de expectativa associado. Os limites superior e inferior baseiam-se nas equações 2.17 e 2.18, praticamente idênticas às equações 2.15 e 2.16, visto que o declive das retas características se mantém, variando apenas a ordenada na origem, com um valor mais alto no caso do limite superior e um valor inferior no caso do limite inferior.

$$\text{Limite superior: } T_o = 0,33 \times T_{RM}^n + 18,8 + 4 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.17)$$

$$\text{Limite inferior: } T_o = 0,33 \times T_{RM}^n + 18,8 - 4 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.18)$$

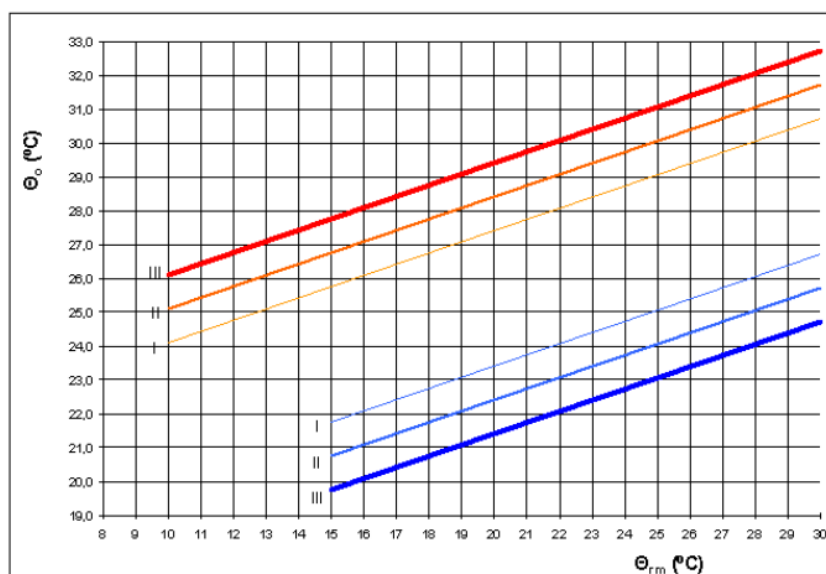


Figura 23 - Influência do tipo de edifício no cálculo da temperatura operativa [29]

A tabela A.2 do anexo A da EN 15251 prevê valores limite para a estação de aquecimento em edifícios com sistema AVAC. Para a categoria II de conforto, no que diz respeito ao limite superior, para valores da temperatura média exterior ponderada inferiores a 10°C, este assume um valor constante de 26 °C, enquanto que o limite inferior assume um valor constante igual a 20 °C para valores de temperatura média exterior ponderada inferiores a 15 °C [29]. Quando aplicada a categoria III de conforto estes limites passam a assumir os valores de 28°C e 18°C para os limites superior e inferior, respetivamente (Figura 24) [29].

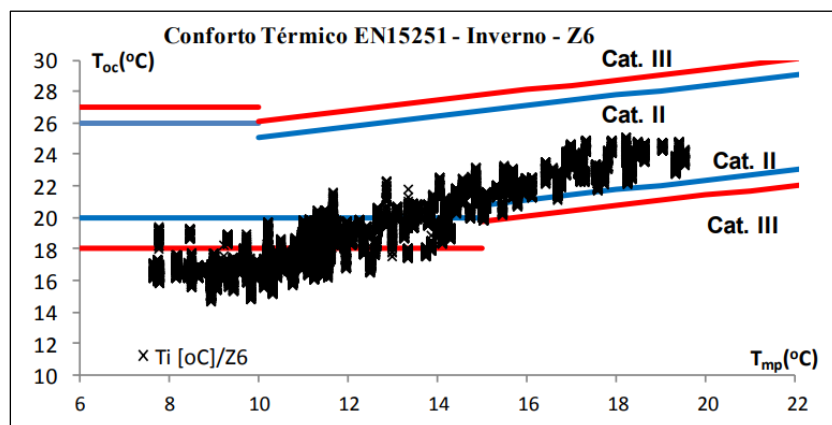


Figura 24 - Conforto térmico à luz da EN 15251, na estação de aquecimento [37]

3

CASO DE ESTUDO

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No capítulo que se segue é exposto o caso de estudo abordado nesta dissertação, através da caracterização da habitação em estudo, da respetiva localização e do clima característico da região. Também neste capítulo é explicada a metodologia adotada para os diferentes ensaios, realizados no âmbito deste trabalho e que ocorreram no período de primavera, entre março e maio de 2021, onde se incluem também os ensaios preliminares de averiguação do estado de equipamentos. É igualmente efetuada uma análise breve ao acompanhamento efetuado das condições de ocupação da habitação, onde é alvo de estudo o efeito da presença de ocupantes no espaço, mas também o efeito da abertura ou acionamento de determinados equipamentos de ventilação na qualidade do ar interior.

3.2. LOCALIZAÇÃO E CLIMA

A habitação objeto deste caso de estudo localiza-se no centro de Amarante (Figura 25), no distrito do Porto. De acordo com a NUTS III esta localidade está inserida na região do Tâmega e Sousa, fazendo fronteira com os municípios de Felgueiras, Mondim de Basto, Celorico de Basto, Vila Real, Baião, Marco de Canaveses, Lousada e Penafiel. O território é bastante irregular, com um relevo acentuado, sendo atravessado ao longo da sua extensão pelo rio Tâmega, um dos afluentes do rio Douro. Apesar de no seu território se localizarem duas serras (Aboboreira e Marão), grande parte do território apresenta altitudes inferiores a 600 metros, onde se inclui a habitação em estudo.



Figura 25 - Localização da habitação em estudo [38]

Esta zona apresenta um clima temperado com inverno chuvoso e verão seco e quente, característico de um clima do tipo Csb, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger [39]. Na Figura 26 é apresentado um resumo meteorológico do clima da cidade de Amarante, baseado no clima observado em anos anteriores, disponível em *weatherspark.com*. Esta é, portanto, uma zona com temperaturas medianas ao longo de todas as estações, com uma incidência de temperaturas médias horárias entre os 7 °C e os 29 °C. Em termos de precipitação apresenta um valor médio de chuva mensal máximo de 135 mm atingido em dezembro, enquanto que o valor mínimo é, presumivelmente, atingido no verão, com 12 mm, nos meses de julho e agosto. A sensação de humidade, medida pela percentagem do tempo em que o nível de conforto de humidade é abafado, opressivo ou extremamente húmido, não varia significativamente ao longo do ano, permanecendo praticamente nulo, confirmando-se nesta variante a prevalência do clima seco, característico do interior do nosso país, com variação ligeira no verão, em que são atingidos valores agradáveis ou húmidos, de acordo com a escala proposta na Figura 26.

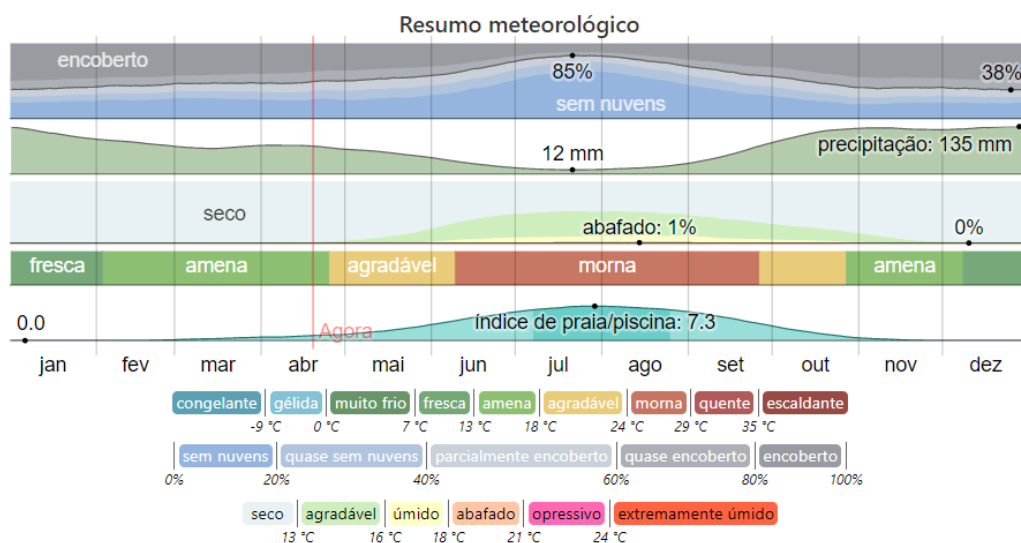


Figura 26 - Resumo meteorológico da cidade de Amarante para o ano de 2021 [40]

Também no *website* do Portal do Clima, da responsabilidade do Instituto Português do Mar e da Atmosfera, é possível aceder a um histórico simulado para a temperatura e humidade relativa, entre outros, da região do Tâmega e Sousa, baseado numa média de trinta anos, para o intervalo de 1971 a 2000 (Figura 27). Previsivelmente as temperaturas médias máximas são ligeiramente inferiores às atuais, consequência do aquecimento global, que tem vindo a provocar um consecutivo aumento destas temperaturas. Relativamente à humidade relativa do ar os picos dão-se ao longo do Inverno, onde são atingidos valores na ordem dos 85%. Os valores mínimos são atingidos no mês de agosto, onde a média assume valores inferiores a 65%. Para o período primaveril, alvo de análise neste caso de estudo estes valores de humidade relativa estão no intervalo dos 75 % aos 80 %, enquanto que a temperatura média assume valores entre os 8°C e os 15°C.

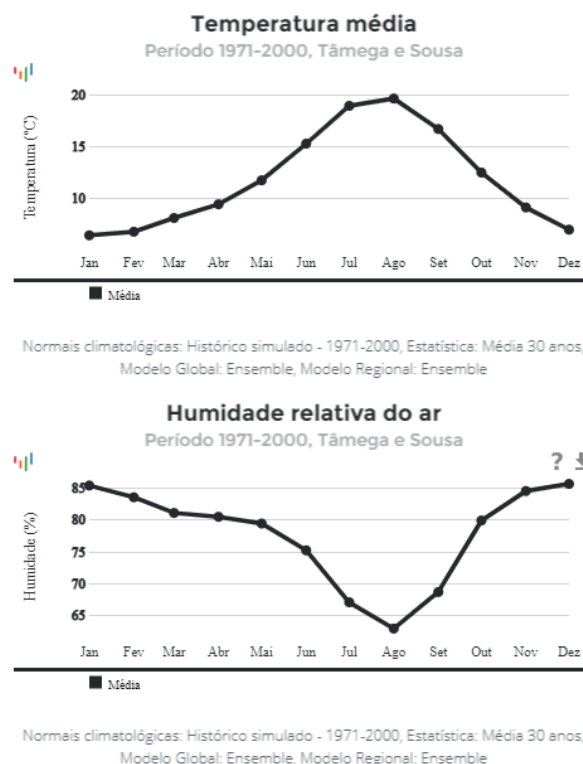


Figura 27 - Histórico simulado da temperatura média e humidade relativa do ar para a região do Tâmega e Sousa, 1971 a 2000 [41]

3.3. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO

A habitação em questão é parte integrante de um edifício multifamiliar de 10 pisos, correspondendo os 7 pisos elevados às habitações, o rés do chão ao hall de entrada e os dois pisos inferiores à zona de garagem e anexos. Esta apresenta uma tipologia T3, localizando-se no 6º piso deste edifício e sendo constituída por 3 quartos, 2 casas de banho, cozinha, sala de estar, despensa e uma zona de marquise, anexa à cozinha. As dimensões de cada uma destas divisões e a respetiva disposição são expostas na Figura 29. A fachada principal da habitação em questão está orientada a este, como representado na Figura 28 (quartos 2 e 3), existindo ainda uma fachada com orientação a oeste (sala e cozinha) e uma fachada lateral orientada a sul (quarto 1 e sala). Com orientação a norte tem-se uma parede exterior que faz a separação entre a habitação analisada e a habitação adjacente, existindo também uma zona de caixa de escadas e elevador (Figura 29). Todas as paredes exteriores possuem um sistema construtivo em alvenaria dupla com caixa de ar pelo interior, enquanto que as paredes interiores são constituídas por alvenaria simples de tijolo com espessura de 11 cm.

Relativamente aos equipamentos com influência na ventilação da habitação tem-se na cozinha o único equipamento mecânico, com a instalação de um exaustor mecânico manual. Nos compartimentos principais a admissão de ar é realizada através da caixilharia de alumínio existente em torno da janela simples de correr, também em alumínio, sem corte térmico, com caixa de estore de manuseamento manual. No quarto de banho 1 e na despensa têm-se grelhas de admissão e extração de ar locais localizadas a 0,15 e 2,40 metros do chão, respetivamente. Importa referir que não existe qualquer tipo de grelha de passagem de ar nas portas interiores, dando-se a circulação do ar através da folga existente sob a porta.



Figura 28 - Fachada principal do edifício (este)

A metodologia de estudo inclui a recolha de dados in situ relativos à temperatura, humidade relativa e concentração de dióxido de carbono, através de equipamentos portáteis com capacidade de armazenamento de dados, cujas posições de monitorização estão identificadas na Figura 29.

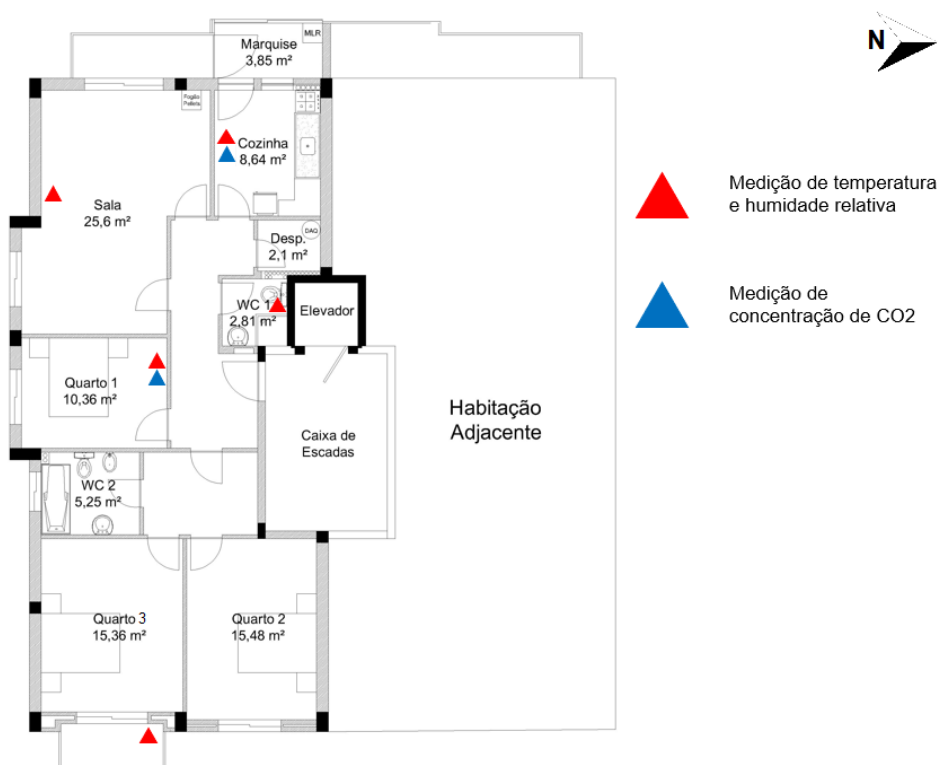


Figura 29 - Planta da habitação em estudo e respetivas zonas de monitorização

3.4. METODOLOGIA DE ENSAIO

3.4.1. MEDIÇÃO DE HUMIDADE E TEMPERATURA

Um dos assuntos abordados na presente dissertação é a análise de conforto térmico, sendo, para tal, fundamental realizar as medições da temperatura nas divisões em estudo. As medições ocorreram nos locais identificados através de triângulos vermelhos na Figura 29. A esta medição da temperatura acresce a medição da humidade relativa, relevante também no contexto de análise do conforto térmico através do método gráfico da ASHRAE 55. Estas medições foram realizadas em regime contínuo através de termohigrómetros idênticos aos da Figura 30 (Hobbo U12-011 à esquerda e Hobbo UX100-011 à direita), cujas principais características são expostas na Tabela 3. Os equipamentos foram sempre colocados a cotas de aproximadamente 1 metro.

Tabela 3 - Especificações técnicas dos sensores de temperatura e humidade relativa utilizados

Modelo	Hobbo U12-011	Hobbo UX100-011
Parâmetros	temperatura e humidade relativa	temperatura e humidade relativa
Intervalo	-20...+70 °C; 5...95 % H.R.	-20...+70 °C; 1...95 % H.R.
Precisão	$\pm 0,35$ °C (0...50 °C); $\pm 2,5\%$ (10...90%)	$\pm 0,21$ °C (0...50 °C); $\pm 2,5\%$ (10...90%) e $\pm 5\%$ (<10% ou >90%)
Memória	43000 valores de medição	63488 valores de medição
Quota de medição	1 segundo a 18 horas	
Condições ambientais	não condensação	
Tipo de bateria	lítio CR-2032	
Peso	30 g	

Estes dispositivos, sendo portáteis, funcionam através de bateria interna (pilha), que simultaneamente com o módulo de memória interna permitem a recolha de dados para períodos prolongados. Apesar desta característica e da colocação de dois aparelhos por zona de monitorização, para prevenir falhas no sistema de ambos os dispositivos que pudessem impedir a recolha de dados, efetuou-se o levantamento e respetiva reprogramação bissemanalmente. A vulnerabilidade dos sensores de humidade e temperatura à água e a influência do impacto da radiação solar direta nos equipamentos exigiram cuidados adicionais, como por exemplo na disposição dos equipamentos, que foram sempre colocados no interior em locais protegidos da luz solar e no exterior num elemento opaco e parcialmente fechado lateralmente, de forma a impedir igualmente o impacto de radiação solar direta e o contacto da chuva. Estes equipamentos foram programados através do *software* HOBOWare (Figura 31), para recolha e gravação de dados em intervalos de 10 minutos.



Figura 30 - Termo higrómetros utilizados no caso de estudo (Hobbo U12-011 e Hobbo UX100-011)

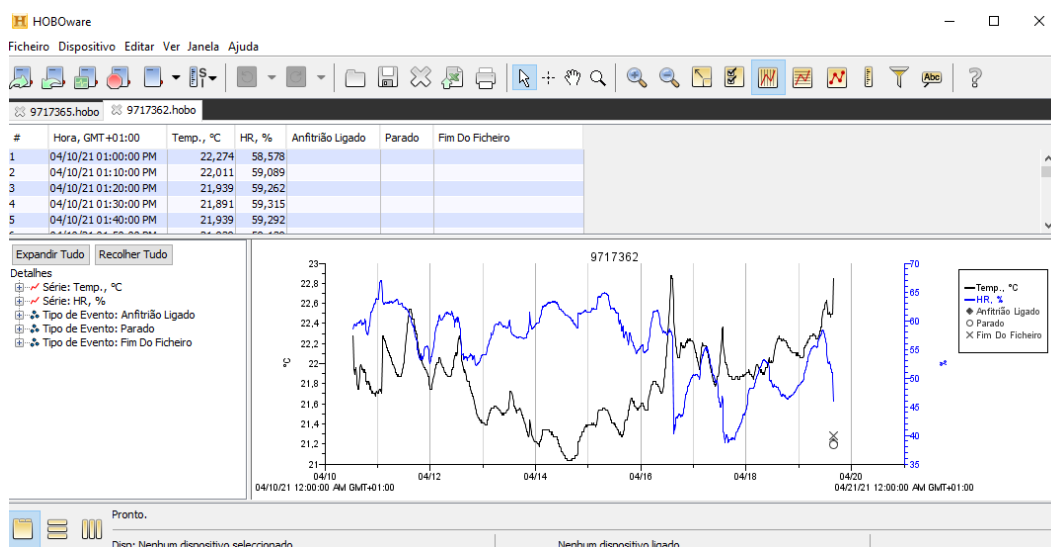


Figura 31 - Software HOBOWare

Após a recolha dos dados, com as respetivas medições intercaladas por 10 minutos, efetuou-se uma média horária dos 6 valores recolhidos a cada hora. Estes valores finais de médias horárias foram então utilizados para a avaliação de conforto térmico através do método ASHRAE55 e EN15251, cujos cálculos foram explicados previamente na secção 2.6 desta dissertação. No que se refere ao método gráfico da ASHRAE foram relevantes os dados de temperatura e humidade relativa das divisões interiores (Quarto 1, Sala, Cozinha e Quarto de Banho 1), enquanto que para o método da EN15251 interessaram apenas os dados relativos à temperatura, das divisões interiores e do exterior.

3.4.2. MEDIÇÃO DE CONCENTRAÇÃO DE CO₂

A análise da qualidade do ar interior foi realizada através da medição dos caudais de ventilação, utilizando-se para tal medidores da concentração de dióxido de carbono (CO₂), modelo Chauvin&Arnoux CA1510 (Figura 32). Estes dispositivos permitem a recolha de dados, em regime contínuo, da concentração de CO₂, temperatura e humidade relativa. No âmbito desta dissertação apenas foram utilizadas as medições da concentração de CO₂. A aplicação deste equipamento implicou também a utilização do seu *software* específico para programação e recolha de dados, sendo que esta recolha poderia ser efetuada via Bluetooth ou USB.

A posição destes equipamentos na habitação é indicada pelos triângulos azuis da Figura 29, sendo que a cota a que estes se encontram é idêntica à dos sensores de temperatura e humidade relativa, ou seja, a cerca de 1 metro do pavimento. Numa primeira fase estes equipamentos estiveram colocados no quarto 1 e numa fase posterior na cozinha, para estudo e análise das taxas de renovação do ar nas duas divisões, de acordo com diferentes cenários de envolvente.



Figura 32 - Dispositivos de medição da concentração de CO₂, Chauvin&Arnoux CA1510

A taxa de renovação de ar foi avaliada através do método do gás traçador e da técnica do declive, o que implicou injeção do gás traçador (dióxido de carbono) no quarto 1 e na cozinha, através do extintor representado na Figura 33. Durante e após a injeção do gás, e de forma a garantir uma mistura homogênea do mesmo, utilizou-se um ventilador de chão, por um período de cerca de 5 minutos.

Os ensaios seguiram os procedimentos indicados na ASTM E741, preparando-se para o efeito uma folha de cálculo (Figura 34), que permitiu determinar os diferentes valores da taxa de renovação de ar. A aplicação deste método utilizando o CO₂ como gás traçador implica que seja subtraída a concentração do gás no exterior, tendo-se considerado para o efeito o valor de 400 ppm. A partir do valor da taxa de renovação de ar horária, multiplicado pelo volume da divisão de medição (29,0 m³ no caso do quarto 1 e 24,2 m³ no caso da cozinha) foi possível calcular o caudal de ar na divisão para os diferentes ensaios.



Figura 33 - Extintor de CO₂

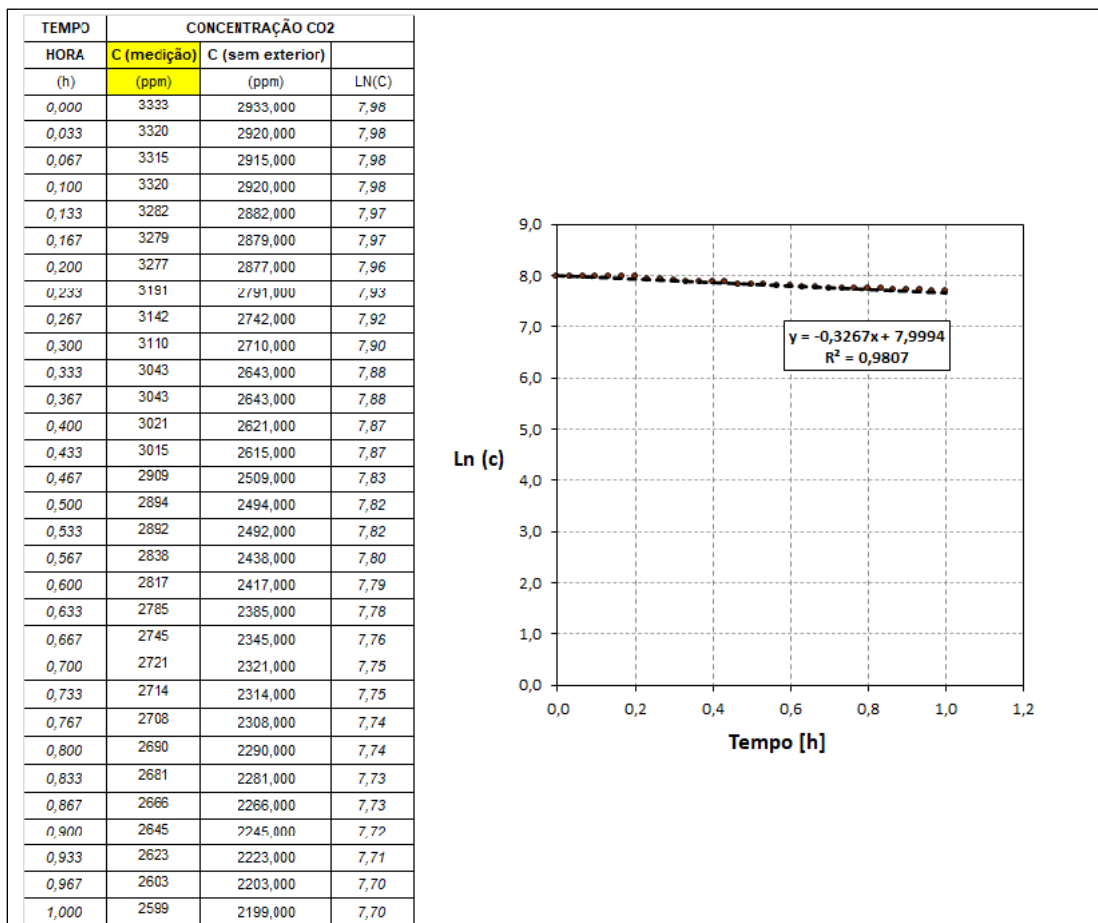


Figura 34 - Método da ASTM E741 para cálculo da taxa de renovação do ar (técnica do declive)

A avaliação da qualidade do ar interior foi realizada para diferentes cenários, associados a diferentes mecanismos de admissão e extração de ar localizados em diversas zonas da habitação. Previamente a ensaios específicos de averiguação de taxas de renovação de ar para situações concretas, determinou-se a taxa de renovação horária do quarto 1, sem qualquer tipo de abertura para o exterior, com todas as portas interiores abertas, à exceção da porta do próprio quarto 1. De seguida foram executados ensaios específicos para averiguação da influência da ação do vento através da abertura de portas e janelas exteriores (lâmina de ar com 1,5 cm de largura), influência da conduta de exaustão natural na casa de banho 1 e interferência do exaustor mecânico na cozinha.

As diferentes especificações para os ensaios realizados no quarto 1 estão expostas na Tabela 4, enquanto que a caracterização dos ensaios efetuados na cozinha é apresentada na

Tabela 5. Para cada um dos cenários o ensaio foi repetido 5 vezes, sendo considerados para avaliação final os 3 resultados intermédios relativos à taxa de renovação de ar, ou seja, eliminando-se para cada ensaio o valor mais alto e o valor mais baixo.

Tabela 4 - Especificação dos ensaios realizado no quarto 1

<i>Decaimento base (sem variantes)</i>				
Cenário	Porta quarto 1	Restantes aberturas interiores	Aberturas exteriores	Exaustor
DN1	Fechada	Abertas	Fechadas	Desligado
<i>Efeito da ação do vento</i>				
	Porta quarto 1	Restantes aberturas interiores	Porta cozinha (exterior)	Janela quarto 2
AV1	Fechada	Abertas	Aberta	Aberta
AV2	Fechada	Abertas	Fechada	Aberta
AV3	Fechada	Abertas	Aberta	Fechada
<i>Efeito da conduta de exaustão natural (WC1)</i>				
	Porta quarto 1	Restantes aberturas interiores	Porta WC1	Aberturas exteriores
CEN1	Fechada	Abertas	Fechada	Fechadas
<i>Efeito da exaustão mecânica na cozinha</i>				
	Porta quarto 1	Porta cozinha (interior)	Restantes aberturas interiores	Exaustor
EM1	Fechada	Aberta	Abertas	Ligado
EM2	Fechada	Fechada	Abertas	Ligado
EM3	Fechada	Fechada	Abertas	Desligado

Tabela 5 - Especificação dos ensaios realizados na cozinha

	Porta interior (Cozinha)	Porta exterior (Cozinha)	Restantes aberturas interiores	Exaustor
VC1	Aberta	Fechada	Abertas	Ligado
VC2	Aberta	Aberta	Abertas	Ligado
VC3	Aberta	Fechada	Abertas	Desligado
VC4	Aberta	Aberta	Abertas	Desligado

3.5. ENSAIOS PRELIMINARES

3.5.1. SENSORES DE TEMPERATURA E HUMIDADE RELATIVA

Para que a comparação entre os dados retirados das diferentes divisões fosse fidedigna, foi realizado preliminarmente um teste para averiguar a funcionalidade e uniformidade dos diferentes equipamentos. Deste modo, foram colocados os 10 equipamentos no mesmo local, sujeitos às mesmas condições, tendo sido registados os valores apresentados na Figura 35 no que se refere à temperatura e os valores apresentados na Figura 36 relativos à humidade relativa.

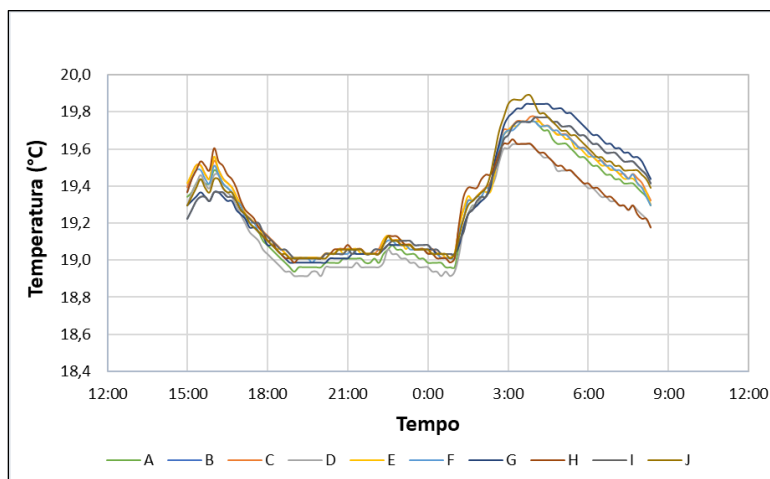


Figura 35 - Ensaio preliminares: variação da temperatura

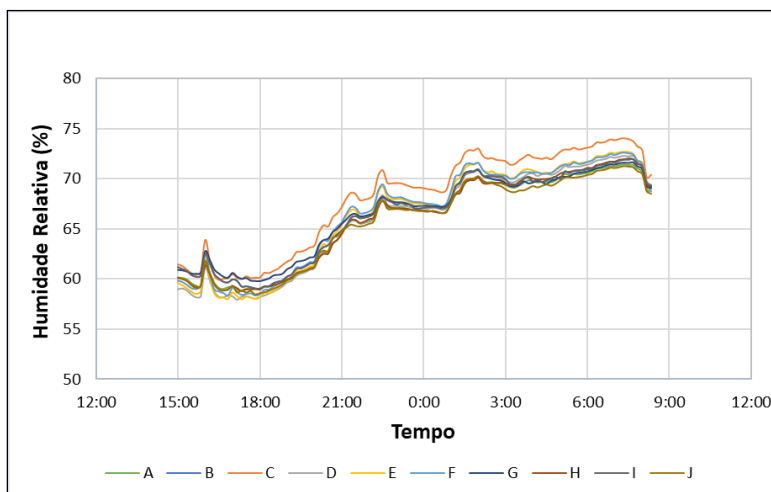


Figura 36 - Ensaio preliminares: variação da humidade relativa

Pela análise dos gráficos concluiu-se que os dispositivos apresentavam variações aceitáveis que permitiam assumir a uniformidade de medições entre equipamentos distintos. Relativamente à variação da temperatura (Figura 35) a diferença máxima entre pontos é pouco superior a 0,2 °C, valor este inferior à incerteza do próprio aparelho abordada na secção 3.4. Relativamente ao gráfico dos dados relativos à humidade relativa (Figura 36), a diferença máxima entre pontos ronda os 2,5%, valor este aproximadamente idêntico ao da incerteza do equipamento.

Os valores recolhidos foram igualmente analisados através da Tabela 6, onde são expressos os valores mínimos, máximos e médios associados a cada um dos dispositivos, assim como o valor médio total, onde se incluem as medições de todos os dispositivos. Deste modo conclui-se que, relativamente às medições mais altas, estas foram efetuadas pelos dispositivos G e J, enquanto que as medições mais baixas foram medidas pelo dispositivo I. Relativamente às medições de humidade relativa os valores mais altos foram medidos pelo dispositivo C, enquanto que os valores mais reduzidos foram medidos pelos dispositivos I e J. Comparando os valores médios medidos por cada um dos dispositivos com o valor médio total de dados recolhidos foi possível concluir que o desvio dos resultados não é relevante visto que mais uma vez, o seu valor é inferior ou aproximadamente idêntico à incerteza dos equipamentos: $\pm 0,21$ °C relativos à temperatura e $\pm 2,5\%$ relativos à humidade relativa.

Tabela 6 - Valores mínimos, máximos e médios de temperatura e humidade relativa no ensaio preliminar dos equipamentos

Sensor	Temperatura (°C)			Humidade Relativa (%)		
	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo	Média
A	18,937	19,746	19,270	58,864	71,448	65,864
B	19,008	19,77	19,312	59,065	71,964	66,319
C	19,012	19,773	19,315	59,869	74,032	67,983
D	18,913	19,627	19,209	57,950	72,324	66,017
E	19,012	19,749	19,310	58,000	72,660	66,379
F	18,988	19,749	19,305	58,305	72,618	66,536
G	18,985	19,841	19,322	59,755	71,649	66,446
H	18,985	19,651	19,270	58,750	72,001	65,930
I	18,794	19,508	19,098	57,883	72,618	65,593
J	19,008	19,888	19,321	58,427	71,287	65,690
Média total			19,273	Média total		66,276

3.5.2. SENSORES DE CONCENTRAÇÃO DE CO₂

Para que dos diferentes ensaios de medição da taxa de renovação do ar se pudessem retirar conclusões válidas foi realizado um ensaio preliminar para averiguar a coerência das medições efetuadas pelos sensores de concentração de CO₂. Deste modo, ambos os dispositivos foram colocados no exterior por um período de cerca de 24 horas, medindo com intervalos de 2 minutos os valores da concentração de CO₂ no ar exterior, tendo-se recolhido os dados apresentados na Figura 37.

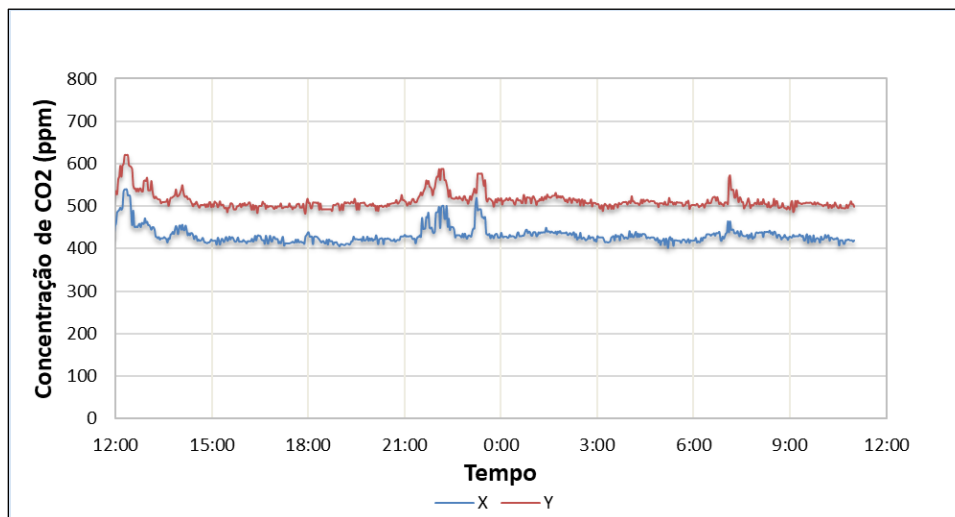


Figura 37 - Ensaio preliminares: comparação de dispositivos de medição da concentração de CO₂

Previamente a qualquer tipo de análise dos dados recolhidos, já era patente que o valor da concentração do gás no exterior seria próximo de 400 ppm, valor este considerado como base para comparação dos valores levantados. Através da Tabela 7, analisando os valores médios recolhidos por cada um dos equipamentos concluiu-se que o dispositivo X foi o que mediu valores mais próximos dos esperados, com um valor médio de 433,62 ppm. O dispositivo Y mediu valores mais elevados, com um valor médio cerca de 81 ppm superior ao do dispositivo X. Por este motivo, nos ensaios subsequentes, foram considerados para a análise apenas os dados recolhidos pelo dispositivo X.

Tabela 7 - Ensaio preliminares: Valores mínimos, médios e máximos da concentração de CO₂

Dispositivo	Mínimo	Máximo	Média
X	402	607	433,62
Y	482	716	514,57

Numa fase inicial realizou-se ainda uma série de ensaios para averiguar a influência da permanência de um ocupante na habitação, aquando da realização dos mesmos, nos valores calculados da taxa de renovação do ar. Deste modo realizaram-se 5 ensaios sem ocupantes na habitação e 5 ensaios com um ocupante, encontrando-se os dispositivos de medição no quarto 1, com a porta do mesmo fechada, permanecendo as restantes portas interiores abertas e as portas e janelas exteriores fechadas. Os resultados destes ensaios estão representados na Tabela 8, tendo-se concluído que os ensaios subsequentes teriam de ser realizados sem qualquer tipo de ocupante na habitação, visto que a permanência de 1 ocupante no interior da ocupação provocava uma redução média no caudal de renovação do ar interior de 3,3 m³/h, relativamente à avaliação do caudal para uma situação sem ocupantes no interior da habitação.

Tabela 8 - Ensaios preliminares: influência da ocupação da habitação no cálculo da taxa de renovação do ar

	Ensaio	RPH (h ⁻¹)	Caudal (m ³ /h)	RPH médio* (h ⁻¹)	Caudal médio* (m ³ /h)
Sem Ocupantes	1	0,59	17,1	0,27	7,9
	2	0,24	7,0		
	3	0,24	7,0		
	4	0,12	3,5		
	5	0,33	9,6		
Um Ocupante	1	0,14	4,1	0,16	4,6
	2	0,21	6,1		
	3	0,19	5,5		
	4	0,13	3,8		
	5	0,14	4,1		

*valor médio calculado a partir dos 3 valores intermédios de RPH

No âmbito da temática da influência da ocupação nos níveis registados da concentração de CO₂ foi ainda registada, por um período de 12 dias, a ocupação da habitação em regime contínuo, em simultâneo com a recolha dos respetivos valores de concentração de CO₂ no quarto 1 (Figura 38). Observou-se então, como era expectável, que o aumento do número de ocupantes da habitação provoca o crescimento da concentração de CO₂, variando a curva da concentração consoante a variação do número de ocupantes, isto é, aumentos repentinos e significativos no número de ocupantes provocam um crescimento mais saliente inicial no nível de CO₂. As zonas de pico da concentração corresponderam a períodos noturnos, em que o número de ocupantes atinge igualmente o valor máximo, fator este que associado ao fecho da porta do quarto 1 provoca valores bastante superiores ao período diário, devido à produção de CO₂ metabólico no interior do quarto combinada com uma envolvente menos permeável. Os picos mais baixos poderão corresponder a noites em que a porta do quarto 1 permaneceu parcialmente aberta ou falhas do equipamento na medição.

Para análise da curva de concentração deve, além da ocupação da habitação, ser considerada a abertura/fecho de portas e janelas com ligação ao exterior ou dispositivos de ventilação, mecânica ou natural, que podem aumentar o fluxo de ar na habitação e, diminuir o nível da concentração de CO₂. Nesse âmbito foi ainda, no período apresentado na Figura 39, analisado o efeito da abertura de portas e janelas exteriores, na concentração de CO₂ na habitação.

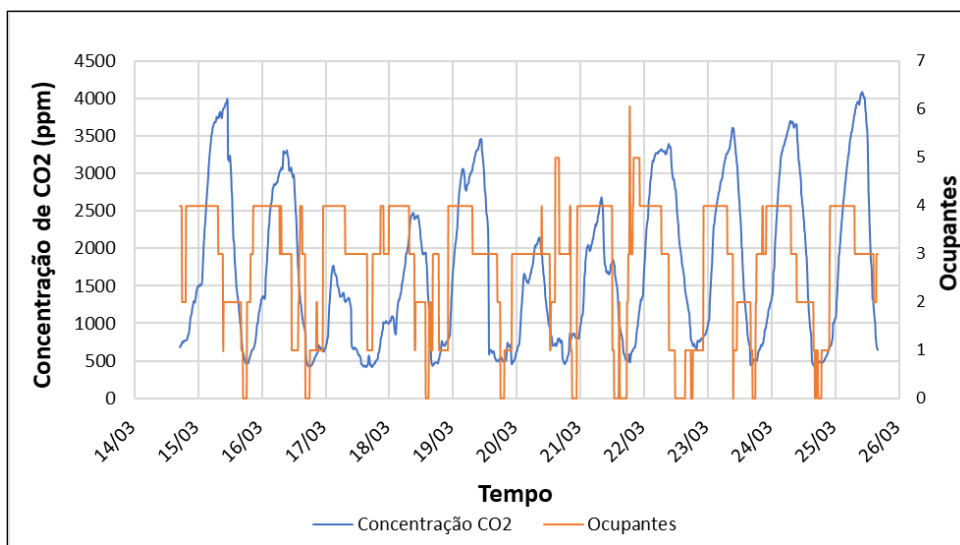


Figura 38 - Ensaios preliminares: efeito da ocupação na concentração de CO₂

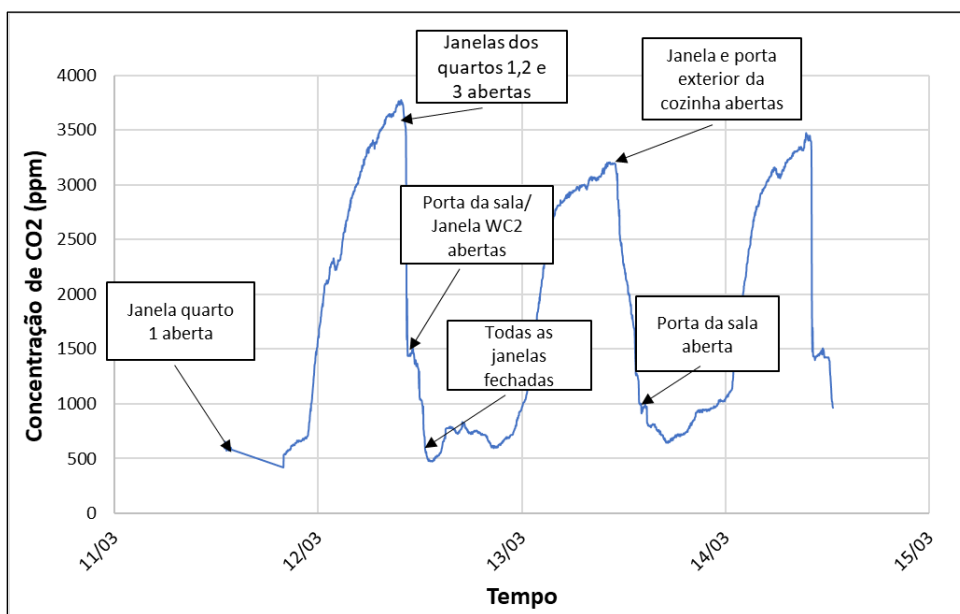


Figura 39 - Ensaios preliminares: efeito da abertura e fecho de portas e janelas na concentração de CO₂

4

RESULTADOS E ANÁLISE DE ENSAIOS

4.1. CONFORTO TÉRMICO

4.1.1 MÉTODO GRÁFICO DA ASHRAE 55

O primeiro método utilizado para a avaliação do conforto térmico da habitação em estudo foi o método gráfico da ASHRAE 55, cujos resultados finais podem ser analisados na Figura 41. Concluiu-se então que a habitação apresentava níveis aceitáveis de conforto térmico, característicos da estação do período em análise, à qual está associada uma temperatura mais amena e uma humidade absoluta no ar moderada, ao que acrescem as próprias características do edifício em estudo. Para um melhor entendimento dos gráficos proporcionados pelo método da ASHRAE 55 optou-se pela divisão do mesmo em 6 zonas distintas (A, B, C, D, E e F) como representado na Figura 40, estando as especificações dos limites de cada uma destas zonas expressas na Tabela 9. As zonas A, C, D, E e F correspondem a situações de desconforto térmico, enquanto que a zona B corresponde à situação de conforto térmico.

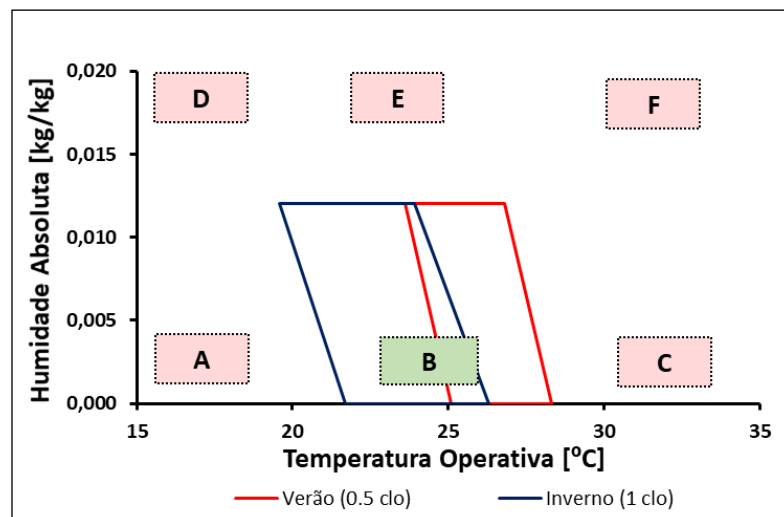


Figura 40 - Método gráfico ASHRAE 55: Zonas

Tabela 9 - Gráficos do método ASHRAE 55: limites por zona

Zona	Temperatura interior, T_i (°C)	Teor de humidade, w (kg/kg)
A	$< \frac{-0,124+w}{0,005714}$	$< 0,012$
B	$\frac{-0,1240+w}{0,0057}$ a $\frac{-0,2264+w}{0,0080}$	$< 0,012$
C	$> \frac{-0,2264+w}{0,0080}$	$< 0,012$
D	$< 19,6$	$> 0,012$
E	$> 19,6$ e $< 26,8$	$> 0,012$
F	$> 26,8$	$> 0,012$

A divisão que apresentou um valor percentual de dados recolhidos dentro da zona de conforto térmico foi o quarto 1, com uma diferença ligeira face às restantes divisões avaliadas (sala, cozinha e quarto de banho). Nesta divisão não são, praticamente, medidos valores humidade absoluta superiores ao limite de 0,012 kg/kg, sendo que apenas 1,5 % dos pontos representados se encontram acima desse limite.

Relativamente à zona da sala, esta apresenta igualmente uma percentagem considerável de valores medidos dentro dos limites de conforto térmico, cerca de 63,7 %, existindo cerca de 0,4 % de pontos com valores de humidade absoluta do ar superiores a 0,012 kg/kg, constatando-se que os valores medidos característicos de desconforto térmico se devem, quase totalmente, a temperaturas inferiores às do limite de conforto para a estação de inverno.

A situação da cozinha é bastante similar à da sala, com cerca de 64% dos pontos em zona de conforto, com uma pequena quantidade de valores medidos de humidade absoluta do ar superior ao limite já referido. Esta similaridade pode estar relacionada com a proximidade destas divisões e o facto de apresentarem a mesma orientação, a oeste.

O quarto de banho 1 foi, de entre as áreas estudadas, aquela que revelou uma maior variedade de valores medidos e, a que revelou um nível mais baixo de conforto térmico, sendo que nesta área, cerca de 0,8 % dos pontos representados apresentam valores de humidade absoluta do ar superiores a 0,012 kg/kg associados a temperaturas inferiores a 20 °C, o que corresponde a uma situação mais crítica de desconforto. A esta percentagem acrescem os restantes 4,1 % de pontos com valores de humidade fora dos limites de conforto e os 38,7 % de pontos que, apesar de apresentarem valores de humidade admissíveis, têm associadas temperaturas interiores demasiado baixas, isto é, inferiores ao limite de conforto.

No panorama geral, e analisando a Tabela 10, concluiu-se que a divisão com valores médios de temperatura e teor de humidade mais elevados é o quarto 1, o que pelos gráficos fornecidos poderia ser difícil de perspetivar, visto que analisando os mesmos gráficos, os valores máximos para o teor de humidade dão-se no quarto de banho, o que se justifica pelas situações pontuais de banhos. Estes picos de humidade do ar no quarto de banho são equilibrados por medições mais baixas, características da

menor utilização do espaço pelos ocupantes e da existência de uma conduta de ventilação natural, que permite a renovação constante do ar, ainda que de forma mais gradual.

No que se refere aos valores médios da temperatura é perceptível a diferença do quarto de banho para as restantes divisões, efeito da localização do mesmo, visto que este não possui qualquer tipo de envidraçado exterior que permita ganhos solares térmicos através do mesmo.

Com a análise dos gráficos da Figura 41 é igualmente perceptível a não existência de qualquer ponto em zona de conforto associada ao verão, ou seja, em zona de desconforto por calor extremo, justificado em grande parte pelo facto de não estarem associadas temperaturas exteriores elevadas ao período de medição em questão.

Tabela 10 - Conforto térmico: Valores médios de temperatura e teor de humidade

Divisão	Temperatura (°C)	Teor de humidade (kg/kg)
Quarto 1	21,02	0,0091
Sala	20,73	0,0084
Cozinha	20,90	0,0085
Quarto de banho 1	20,28	0,0089

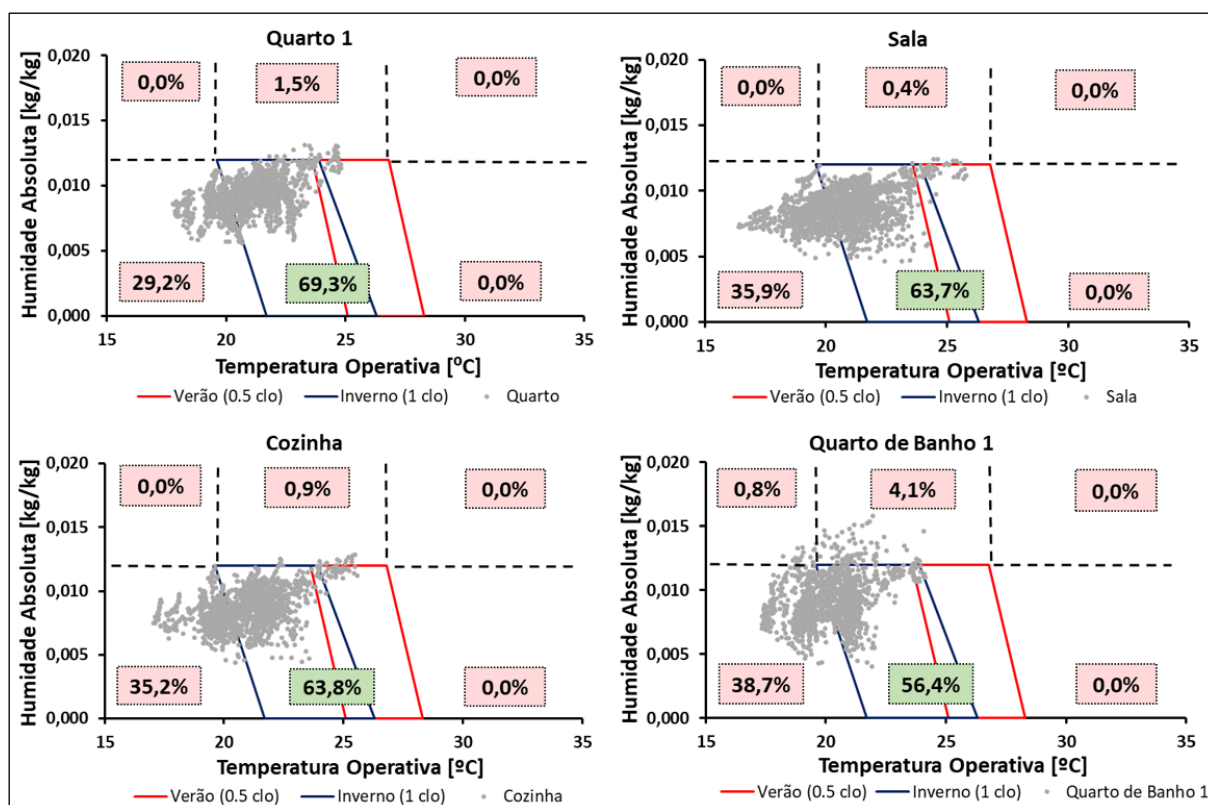


Figura 41 - Método ASHRAE 55: Gráficos

Comparando os valores recolhidos no período diurno (08:00h às 19:59h) e no período noturno (20:00h às 07:59) concluiu-se, pela análise da percentagem de pontos em zona de conforto (Figura 42), que o quarto de banho 1 e o quarto 1 sofreram reduções do nível de conforto do período diurno para o noturno, enquanto que na sala e na cozinha sucedeu o oposto, o que se poderá dever à maior ventilação destas duas últimas divisões durante o dia, entrando ar mais fresco e mantendo a temperatura interior a níveis mais baixos que no quarto 1. Quanto ao ligeiro decréscimo verificado no quarto de banho 1 poderá justificar-se pela quantidade de banhos tomados no período noturno que proporcionam valores de teor de humidade absoluta elevados.

Relativamente à percentagem de pontos em zona de conforto, é notória a estabilização noturna em torno do mesmo valor (entre 66% e 68%) em todas as divisões, com exceção feita ao quarto de banho 1, devido à não existência de tantas variáveis exteriores com interferência no ambiente interior, isto é, não existem ganhos solares nem janelas ou portas abertas para entrada de ar.

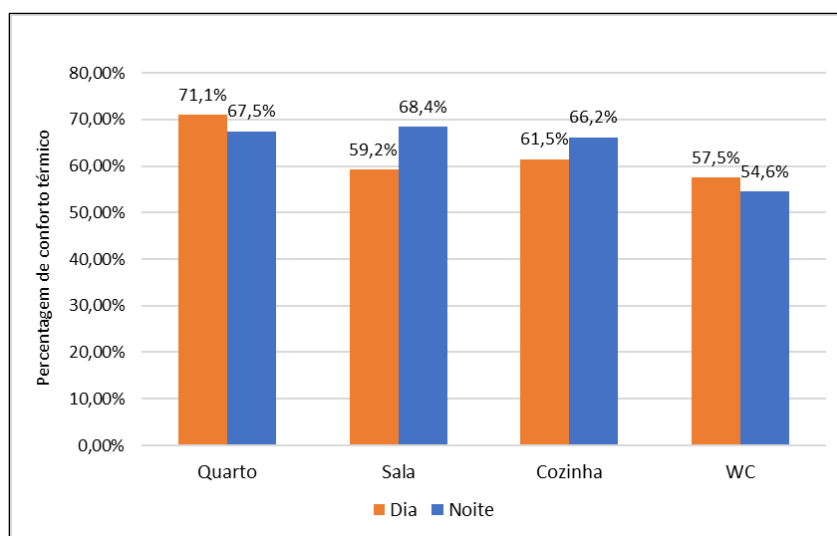


Figura 42 - Avaliação da percentagem de pontos em zona de conforto (dia/noite)

Analisando os valores médios para a temperatura representados na Tabela 11 confirmou-se a diminuta variação de temperatura no quarto de banho 1, permanecendo o seu valor médio constante, a 20,3 °C. Os valores confirmam ainda a estabilização da temperatura noturna nas restantes divisões, na ordem dos 21 °C, devendo-se isto à persistência das mesmas condições em todas estas divisões, ou seja, não existindo luz solar, as transferências de calor com o exterior devem-se especialmente a perdas de calor através das trocas de ar pelas caixilharias ou pelas próprias janelas, que são idênticas em todas as divisões, excetuando o quarto de banho 1, que como já foi referido não possui qualquer tipo de ligação ao exterior, além de uma conduta de ventilação natural.

No que diz respeito à humidade absoluta média, os valores mais elevados são atingidos no período noturno, justificado pela maior presença de ocupantes no interior da habitação e pela permanência das portas e janelas exteriores fechadas, dificultando a renovação do ar. Outra justificação poderá ser a toma de banhos no período noturno, que produz uma quantidade considerável de vapor de água, não se dissipando este tão facilmente como no período diurno, em que existe uma maior circulação de ar pela habitação. A justificação para a homogeneidade da humidade absoluta no quarto 1, quer no período diurno, quer no noturno, prende-se com a permanência do mesmo fechado, com períodos bastante reduzidos e dispersos de ventilação do mesmo, devido à realização dos ensaios de ventilação nesta divisão.

Tabela 11 - Valores médios para a temperatura e teor de humidade (dia/noite)

Divisão	Temperatura (°C)		Teor de humidade (kg/kg)	
	Dia	Noite	Dia	Noite
Quarto 1	21,1	20,9	0,0093	0,0093
Sala	20,5	20,9	0,0084	0,0089
Cozinha	20,8	21,0	0,0084	0,0090
Quarto de banho 1	20,3	20,3	0,0088	0,0096

4.1.2 MÉTODO ADAPTATIVO DA EN 15251

Para análise do conforto térmico da habitação em estudo recorreu-se também ao método adaptativo da norma EN 15251, considerando-se os limites de conforto para as categorias II e III, que correspondem a um nível normal de expectativa associado a edifícios novos ou renovados e a um nível moderadamente aceitável de expectativa associado a edifícios existentes, respetivamente. A habitação estudada tem construção datada na década de 90 e, por isso, incluiu-se claramente na categoria III de análise de conforto térmico. Ainda assim, optou-se por efetuar a análise de conforto considerando a categoria II de forma a retirar ilações acerca da influência da diferente exigência destas categorias no nível de conforto.

Começando então pela análise dos gráficos obtidos com recurso aos limites associados a edifícios de categoria III, representados na Figura 43, é notório que a divisão com um nível superior de conforto térmico é o quarto I, com uma percentagem de pontos obtidos dentro dos limites de conforto igual a 69,7 %. Destaca-se também o quarto de banho I, com uma percentagem bastante mais baixa de pontos dentro da zona de conforto, apenas cerca de 29,5 %, sendo que a justificação para este facto será idêntica à apresentada na secção anterior. A sala e a cozinha apresentam percentagens de 54,2 % e 63,7 %, respetivamente.

Pela análise dos gráficos percebe-se ainda que os pontos abaixo do limite de conforto não apresentam um distanciamento significativo relativamente ao limite de conforto, o que sugere que mesmo os registos associados a uma situação de desconforto térmico não resultam de condições negativas demasiado acentuadas. Além disso, tratam-se de situações de desconforto por temperatura demasiado baixa em período de verão. Isto é facilmente comprovado pela média das distâncias ao limite de conforto inferior, para todos os pontos abaixo desse mesmo limite, representadas na Tabela 12. A divisão com maior percentagem de desconforto térmico é, como se constatou, o quarto de banho 1, apesar de não apresentar o diferencial médio, relativamente ao limite inferior, mais elevado, visto que este valor mais elevado está associado à sala, que atinge temperaturas mais baixas.

Tabela 12 - Método adaptativo da EN15251: Análise aos pontos em situação de desconforto térmico por temperaturas baixas (Cat.III)

Divisão	Σ dos diferenciais relativamente ao limite inferior	Nº de pontos em situação de desconforto (abaixo do limite inferior)	Média do diferencial de desconforto térmico
Quarto 1	311,97	589	0,53
Sala	711,89	890	0,80
Cozinha	356,88	705	0,51
Quarto de Banho 1	834,41	1370	0,61

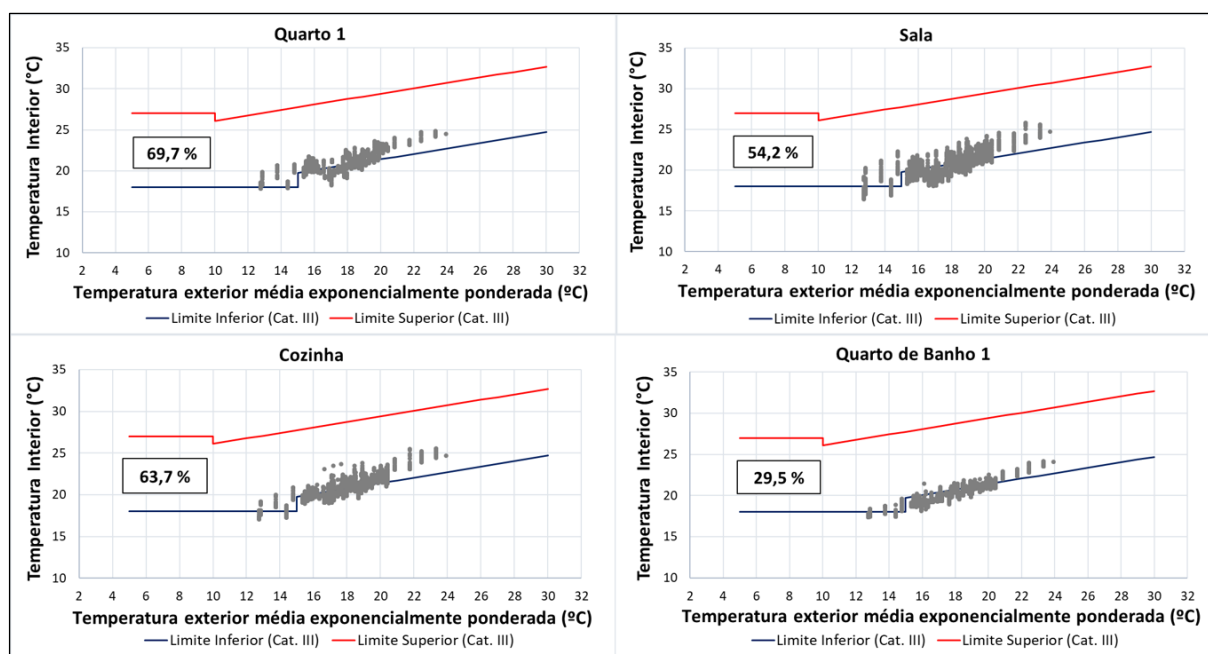


Figura 43 - Método adaptativo da EN15251: Gráficos para a categoria III

Para esta metodologia de análise do conforto térmico foi necessário efetuar a recolha de dados no exterior, de forma a permitir o cálculo da temperatura média móvel exterior, que caracteriza o ambiente exterior. Deste modo, através dos equipamentos posicionados na varanda orientada a este, recolheram-se os valores da temperatura exterior em regime contínuo, estando estes representados no gráfico da Figura 44, onde está expressa a evolução da temperatura exterior ao longo do período de medição. A mesma figura mostra ainda a variação da humidade relativa no mesmo período.

A temperatura oscila, aproximadamente, entre os 6 °C e os 35 °C, com o valor mínimo a ser atingido ainda no mês de março e os valores máximos no mês de maio, sendo que a temperatura média exterior rondou os 18,3 °C, com uma média diurna de 21,0 °C e uma média noturna de 15,5 °C. A humidade relativa tem uma oscilação entre os 19 % e os 92 %, com uma média para o período diurno de 48,4 % e de 64,2 % para o período noturno.

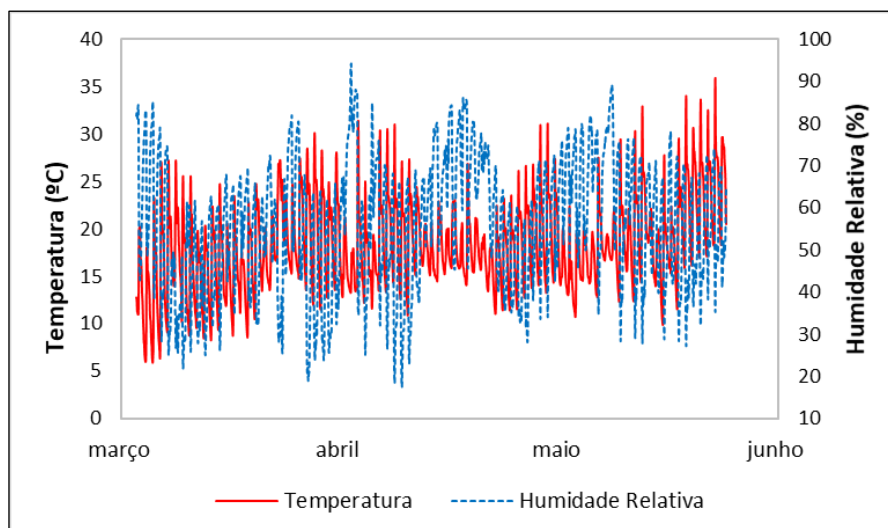


Figura 44 - Condições exteriores: Temperatura e humidade relativa

Como já foi referido foi também efetuada a análise de conforto para uma situação em que a habitação estudada se inserisse numa categoria de edifício do tipo II, associada a edifícios novos e renovados, sendo os respetivos resultados apresentados na Figura 45. São mais que evidentes os valores bastante reduzidos de pontos dentro da zona de conforto térmico, mantendo-se ainda assim o quarto I como a divisão com a maior percentagem (21,3 %) e o quarto de banho I como a divisão com maior desconforto associado, visto que apenas 2,5 % dos pontos representados estão em zona de conforto.

Comparando com os valores associados a limites da categoria III, é por demais evidente a variação brusca nos valores percentuais de pontos associados a uma zona de conforto térmico, com os valores a passarem de 69,7 % para 21,3 % no quarto 1, 54,2 % para 18,9 % na sala, 63,7 % para 15,2 % na cozinha e 29,5 % para 2,5 % no quarto de banho I, como está representado na Figura 45. A passagem da categoria III para a categoria II implica um acréscimo de exigência no valor da temperatura interior de 1 °C. Não é relevante, para o caso estudado abordar o limite superior, visto os pontos obtidos se distribuírem na sua totalidade próximos do limite inferior, para ambas as categorias. Deste modo, globalmente, a alteração do nível de exigência para um patamar superior provocou uma redução média no conforto térmico de 54,3 % para 14,5 %, considerando os dados recolhidos nas quatro divisões analisadas.

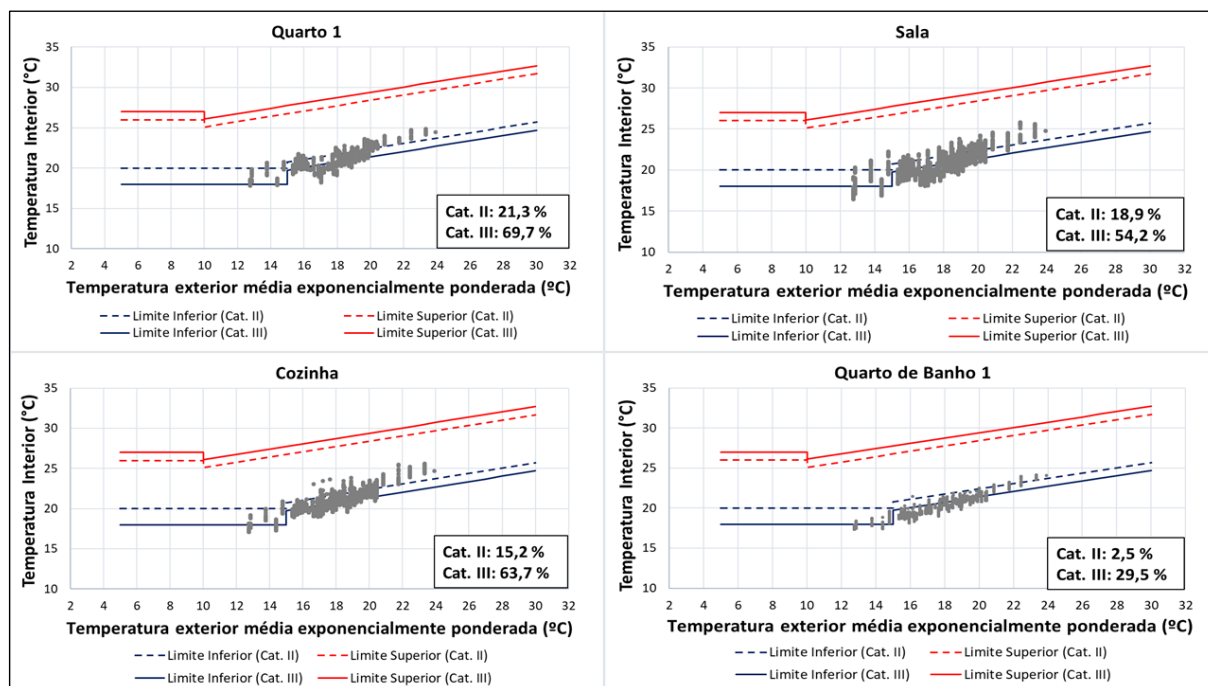


Figura 45 - Método adaptativo da EN15251: Comparação entre as categorias II e III

4.1.3 ANÁLISE COMPARATIVA (ASHRAE 55/ EN 15251)

Tendo sido utilizadas duas metodologias distintas para a avaliação do conforto térmico na habitação, torna-se relevante a comparação entre os resultados obtidos com cada uma delas, considerando igualmente a subdivisão do método adaptativo da EN 15251 nas duas categorias (II e III). Deste modo, na Tabela 13, estão representados os resultados finais relativos à percentagem de pontos medidos, através das médias horárias, associados a uma situação de conforto térmico no interior de cada uma das divisões estudadas. Destaca-se desde logo a diferença dos resultados quando aplicada a abordagem pela categoria II do método adaptativo da EN 15251.

Relativamente à abordagem pelo método adaptativo da EN 15251 para edifícios da categoria III e ao procedimento efetuado pelo método gráfico da ASHRAE 55, concluiu-se que os valores fornecidos são, ainda que distintos, bastante mais próximos, principalmente se se atentar no nível de conforto do quarto I e da cozinha, sendo que o próprio diferencial dos valores calculados na sala não é assim tão significativo, rondando os 11 %. A diferença no quarto de banho 1 já é mais elevada, o que se justifica pelas características do mesmo e da própria localização do quarto de banho 1, que torna o ambiente interior desta divisão praticamente imutável no que concerne a variações provocadas pelo clima e condições externas, o que, visto que o método adaptativo se baseia na avaliação do conforto térmico com recurso a um parâmetro exterior acaba por ser bastante relevante. Já o método gráfico da ASHRAE 55 recorre apenas a parâmetros interiores (temperatura e teor de humidade) e, por isto, este valor percentual de conforto térmico no quarto de banho I é menos diferente, comparativamente às restantes divisões, existindo ainda assim uma ligeira discrepância, já abordada e explicada na secção 4.1.1.

Tabela 13 - Método Gráfico da ASHRAE 55 e Método Adaptativo da EN 15251 (% de conforto térmico)

	EN15251 (Cat. II)	EN15251 (Cat. III)	ASHRAE 55
Quarto I	21,3 %	69,7 %	69,3 %
Sala	18,9 %	54,2 %	63,7 %
Cozinha	15,2 %	63,7 %	63,8 %
Quarto de Banho I	2,5 %	29,5 %	56,4 %

4.2. VENTILAÇÃO

4.2.1 QUARTO I

No âmbito da análise da qualidade do ar interior através da medição das taxas de renovação de ar foram colocados, como referido na secção 3.4.2, dois sensores para medição da concentração de CO₂ no quarto 1, tendo sido efetuadas simulações de diferentes condições de fronteira, para análise da influência de diferentes estratégias de ventilação.

A condição inicial do estudo corresponde a uma situação em que não existe qualquer dispositivo de ventilação mecânica ativado e os mecanismos de ventilação natural não são potenciados, descrito na Tabela 4 como DN1, onde se mantiveram todas as janelas e portas exteriores completamente fechadas, mantendo-se apenas a proteção solar exterior aberta. Na Figura 46 é apresentado o exemplo de um dos gráficos do decaimento do logaritmo da concentração de CO₂ para a determinação da taxa de renovação horária. No exemplo apresentado a taxa de renovação de ar foi de 0,237 h⁻¹, com um coeficiente de determinação de 0,96.

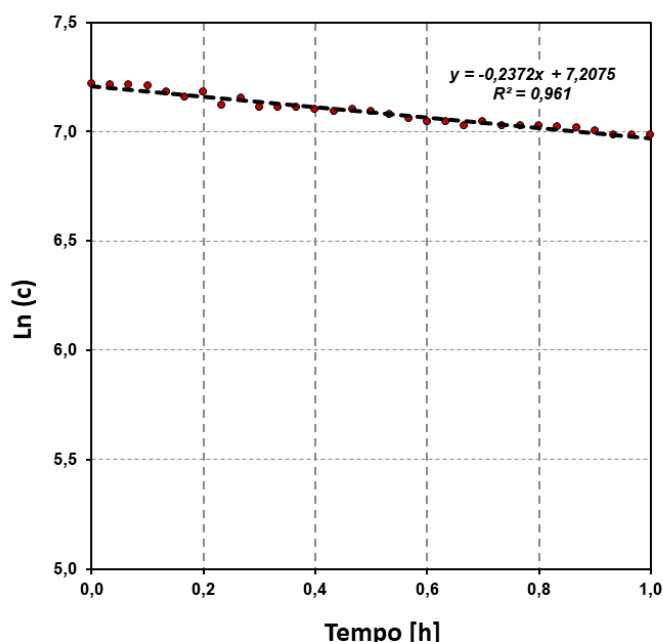


Figura 46 - Ventilação: Decaimento natural no quarto sem variantes (ASTM E741)

A Tabela 14 resume os resultados relativos a este primeiro cenário, em que se concluiu que o quarto 1 apresentava uma taxa de renovação horária de $0,27 \text{ h}^{-1}$, a que corresponde um caudal de renovação do ar interior de $7,83 \text{ m}^3/\text{h}$.

Tabela 14 - Ventilação: Decaimento base sem variantes, DN1

Ensaio	RPH (h^{-1})	R^2	Caudal (m^3/h)	RPH Médio* (h^{-1})	Caudal Médio* (m^3/h)	Desvio Padrão* (h^{-1})	Coefficiente de Variação* (%)
1	0,59	0,98	17,1	0,27	7,83	0,05	19,24
2	0,24	0,96	7,0				
3	0,24	0,97	7,0				
4	0,33	0,98	9,6				
5	0,15	0,95	4,2				

*valor associado às 3 medições de RPH intermédias

Um dos efeitos que se procurou analisar foi o da ação do vento, que é altamente variável quer em termos de direção, quer de velocidade. Para a presente dissertação foram utilizados, para estes parâmetros, dados recolhidos pela estação de Luzim (Penafiel), localizada a cerca de 50 km da habitação em estudo. Deste modo, foram analisados 3 cenários associados ao efeito da ação do vento, presentes na Tabela 4 (AV1, AV2 e AV3), com a realização de 5 ensaios para cada um dos casos, através dos quais se calcularam os valores apresentados na Tabela 15. Nestes ensaios foram potenciadas as condições de ventilação através da abertura de portas e / ou janelas exteriores na cozinha (à esquerda na Figura 47 e no quarto 2 (à direita na Figura 47)).



Figura 47 - Efeito da ação do vento na ventilação (aberturas exteriores na cozinha e no quarto 2)

Antes de efetuar qualquer tipo de análise dos dados recolhidos é conveniente fazer referência aos valores elevados do coeficiente de variação, devidos à imprevisibilidade do vento, tanto a nível de velocidade como direção. Ainda assim é, como seria de prever, mais elevada a taxa de renovação do ar interior numa situação em que permaneçam abertas a porta da cozinha com ligação ao exterior e a janela do quarto 2, com um caudal de 17,60 m³/h, mais que dobrando o valor do caudal associado à situação de referência. O valor ligeiramente superior para a taxa de renovação de ar na situação AV3 comparativamente à situação AV2 poderá dever-se não apenas à direção e velocidade do vento, como referido, mas também à área de admissão de ar, que no caso de abertura da porta exterior na cozinha é superior à abertura da janela do quarto 2.

Tabela 15 - Ventilação: Decaimento sob o efeito da ação do vento / abertura de portas e janelas (AV1, AV2 e AV3)

Ensaio	RPH (h ⁻¹)	R ²	Caudal (m ³ /h)	Vento (m/s)	RPH Médio* (h ⁻¹)	Caudal Médio* (m ³ /h)	Desvio Padrão* (h ⁻¹)	Coeficiente de Variação* (%)
AV1								
1	0,32	0,94	9,2	1,2 ESE	0,61	17,60	0,09	14,21
2	0,53	0,89	15,3	1,5 W				
3	0,75	0,94	21,8	3,2 SSE				
4	0,59	0,90	17,2	0,9 WNW				
5	0,70	0,96	8,0	3,3 SSE				
AV2								
1	0,58	0,95	16,8	2,5 S	0,47	13,55	0,15	31,61
2	0,30	0,97	8,6	2,2 E				
3	0,23	0,90	6,7	1,9 SE				
4	0,52	0,91	15,1	1,5 NW				
5	1,1	0,98	30,7	1,5 WSW				
AV3								
1	0,17	0,88	4,8	1,2 NW	0,53	15,37	0,25	46,37
2	0,35	0,95	10,2	1,5 WSW				
3	1,19	0,99	34,6	2,0 W				
4	0,81	0,94	23,4	1,2 WSW				
5	0,43	0,94	12,6	1,7 NW				

*valor associado às 3 medições de RPH intermédias

Para avaliar o efeito da conduta de ventilação natural existente no quarto de banho 1 (Figura 48) foram realizados os 5 ensaios apresentados na Tabela 16. Desta forma chegou-se a um valor médio para a taxa de renovação horária de $0,27 \text{ h}^{-1}$, aproximadamente idêntico ao valor associado à situação de referência, em que a porta do quarto de banho permaneceu aberta. Concluiu-se assim que esta conduta não provoca uma variação significativa na taxa de renovação de ar no quarto 1. Esta constatação é, ainda assim, facilmente justificada pela existência de duas barreiras à circulação do ar entre as duas divisões, visto que tanto a porta do quarto de banho 1 como a do quarto 1 permaneceram fechadas.

Contudo, o valor do coeficiente de variação revela um grau elevado de incerteza, que se poderá dever a entradas de ar por caixilharias e frinchas das janelas, eventualmente potenciadas por intensidades superiores do vento aquando da realização dos ensaios.



Figura 48 - Grelha de exaustão de ar no quarto de banho 1

Tabela 16 - Ventilação: Efeito da conduta de ventilação natural no quarto de banho 1

Ensaio	RPH (h^{-1})	R^2	Caudal (m^3/h)	RPH Médio* (h^{-1})	Caudal Médio* (m^3/h)	Desvio Padrão* (h^{-1})	Coeficiente de Variação* (%)
1	0,12	0,85	3,1	0,27	7,95	0,15	55,14
2	0,28	0,99	8,1				
3	0,42	0,96	12,2				
4	0,44	0,98	12,8				
5	0,11	0,92	3,1				

*valor associado às 3 medições de RPH intermédias

Relativamente ao efeito da exaustão mecânica na cozinha (Figura 49) foram idealizados e ensaiados os 3 cenários já caracterizados na Tabela 4, sendo os resultados apresentados na Tabela 17. É notória a diferença no caudal de renovação do ar no quarto 1 do cenário EM1 para os cenários EM2 e EM3, constatando-se que o fecho da porta na cozinha anulou o efeito da exaustão mecânica, visto que para uma situação com as portas interiores da cozinha e do quarto 1 fechadas, o estado do exaustor mecânico é praticamente irrelevante, tendo-se calculado para ambos os cenários (EM2 e EM3) taxas de renovação horárias no quarto 1 praticamente idênticas. O caudal medido para estes dois últimos cenários é também idêntico ao valor medido para o primeiro cenário (DN1), comprovando a não influência da abertura ou fecho da porta interior da cozinha, numa situação em que o exaustor permaneça desligado.

Analisando o caudal de renovação do ar interior no quarto 1 para uma situação em que o exaustor mecânico permaneceu ligado e a porta interior da cozinha aberta, concluiu-se que este duplicou relativamente à situação base, passando de cerca de 7,8 m³/h para 14,2 m³/h.



Figura 49 - Exaustor mecânico (cozinha)

Tabela 17 - Ventilação: Efeito da exaustão mecânica na cozinha

Ensaio	RPH (h ⁻¹)	R ²	Caudal (m³/h)	RPH Médio* (h ⁻¹)	Caudal Médio* (m³/h)	Desvio Padrão* (h ⁻¹)	Coefficiente de Variação* (%)
EM1							
1	0,43	0,98	12,6	0,49	14,2	0,05	10,80
2	0,53	0,95	15,4				
3	0,32	0,95	9,3				
4	0,51	0,96	14,8				
5	0,58	0,98	16,8				
EM2							
1	0,30	0,98	8,7	0,27	7,9	0,03	9,21
2	0,40	0,83	11,7				
3	0,27	0,92	7,9				
4	0,25	0,52	7,3				
5	0,23	0,82	6,7				
EM3							
1	0,28	0,87	8,0	0,29	8,3	0,03	10,66
2	0,32	0,95	9,2				
3	0,26	0,93	7,5				
4	0,25	0,91	7,3				
5	0,55	0,98	16,0				

*valor associado às 3 medições de RPH intermédias

Comparando todos os ensaios efetuados no quarto 1 e as respetivas conjunturas associadas a cada um destes é nítida a diferença nas taxas de renovação do ar interior associadas aos 3 cenários idealizados para análise do efeito da ação do vento e ainda a taxa calculada no cenário EM1, com exaustão mecânica na cozinha. Para os restantes cenários concluiu-se que o efeito era praticamente nulo, visto que os valores calculados são praticamente da mesma ordem, ou seja, cerca de $0,3 \text{ h}^{-1}$.

A ventilação natural da habitação através do aproveitamento da ventilação cruzada proporcionada pela ação do vento, que incide numa fachada, saindo pela fachada oposta, proporcionou o maior caudal de renovação do ar calculado no quarto 1, com $17,6 \text{ m}^3/\text{h}$. Esta aparente eficiência da ventilação cruzada relativamente à ventilação mecânica pode em parte explicar-se pela amplitude do próprio movimento do ar, visto que existe um movimento por toda a habitação, de fachada a fachada.

Tabela 18 - Taxas de renovação do ar médias no Quarto 1 para os diferentes cenários

DN1	AV1	AV2	AV3	CEN1	EM1	EM2	EM3
0,27	0,61	0,47	0,53	0,27	0,49	0,27	0,29

4.2.2 COZINHA

De forma a estudar a ventilação na cozinha foram idealizados os 4 cenários abordados na secção 3.4.2, em que se calculou localmente, na cozinha, o efeito do exaustor mecânico e da ação do vento. De entre os cenários estudados destaca-se claramente a situação em que a renovação do ar interior ocorre com entrada de ar através de uma porta com ligação ao exterior ligeiramente aberta em conjunto com o funcionamento do exaustor mecânico (VC2) para extração do ar, sendo que se calculou para esta situação um caudal médio de renovação do ar interior de $103,8 \text{ m}^3/\text{h}$.

Relativamente às duas situações em que o exaustor permaneceu desligado foi, como seria expectável, no cenário com abertura da porta com ligação ao exterior que se verificou o valor médio mais elevado para a taxa de renovação de ar na cozinha, com $5,12 \text{ h}^{-1}$, enquanto que para um cenário em que a mesma porta se manteve fechada foi calculada uma taxa de renovação horária de $4,38 \text{ h}^{-1}$. No que se refere aos cenários VC1 e VC3, em que a porta exterior da cozinha permanece fechada para ambas, variando apenas o estado do exaustor (ligado para VC1 e desligado para VC3), denota-se como expectável uma taxa de renovação superior para o primeiro cenário com um caudal médio de cerca de $119,4 \text{ m}^3/\text{h}$, sendo este um valor, ainda assim, não tão superior ao do cenário VC3 ($105,9 \text{ m}^3/\text{h}$), como se podia prever. Outra ilação interessante a retirar é que para uma situação (VC4) em que o exaustor permaneceu desligado o caudal médio de renovação de ar revelou-se superior ($123,9 \text{ m}^3/\text{h}$), ainda que ligeiramente, a um cenário em que o equipamento permaneceu ligado, ou seja, do ponto de vista da concentração de CO_2 , a abertura da porta exterior provocou um efeito idêntico à ativação do exaustor mecânico.

Tabela 19 - Ventilação de ar na cozinha (medição local)

Ensaio	RPH (h ⁻¹)	R ²	Caudal (m ³ /h)	RPH Médio* (h ⁻¹)	Caudal Médio* (m ³ /h)	Desvio Padrão* (h ⁻¹)	Coeficiente de Variação* (%)
VC1							
1	3,78	0,97	91,4	4,94	119,43	0,76	15,44
2	5,50	0,98	133,1				
3	5,44	0,98	131,6				
4	5,31	0,88	128,5				
5	4,06	0,99	98,2				
VC2							
1	5,78	0,93	139,8	6,54	158,1	0,79	12,12
2	6,47	0,93	156,5				
3	8,08	0,96	195,5				
4	7,36	0,96	178,1				
5	4,9	0,94	118,5				
VC3							
1	4,82	0,95	116,5	4,38	105,9	0,16	3,74
2	1,96	0,97	47,5				
3	4,33	0,91	105,7				
4	4,22	0,93	102,1				
5	4,55	0,93	110,0				
VC4							
1	7,37	0,97	178,3	5,12	123,9	0,46	9,05
2	5,49	0,96	132,8				
3	5,27	0,94	127,5				
4	2,51	0,91	60,7				
5	4,60	0,97	111,3				

*valor associado às 3 medições de RPH intermédias

5

CONCLUSÕES

5.1. CONCLUSÕES PRINCIPAIS

As principais conclusões da campanha experimental realizada na habitação integrante do edifício multifamiliar, localizado na cidade de Amarante, entre março e maio de 2021 são as apresentadas nos pontos seguintes:

I. Conforto térmico:

- A análise do conforto térmico através do método gráfico da ASHRAE 55 proporcionou resultados mais positivos do que os calculados através do método adaptativo da EN 15251, o que manifesta uma maior exigência deste último relativamente ao primeiro, podendo isto dever-se à influência da temperatura exterior no cálculo do conforto térmico para o método adaptativo.
- Em divisões idênticas, com vãos similares, quanto maior o período de ventilação natural do espaço menor a temperatura do ar interior e, consequentemente, menor o nível de conforto térmico associado.
- A ventilação natural provoca, quando a temperatura exterior é inferior à temperatura interior, uma diminuição da temperatura do ar no interior da habitação. Quando a este facto acresce a redução da humidade absoluta do ar, devida também à entrada de ar fresco, verificam-se, em muitos casos, situações de desconforto térmico, como averiguado pela análise gráfica da ASHRAE 55. O mesmo sucede para o método adaptativo da EN 15251, apesar de neste caso, apenas uma das variáveis sofrer alteração (temperatura interior), visto que a temperatura exterior não depende de condições interiores.
- Relativamente à análise pelo método adaptativo da EN 15251, a alteração da análise para uma categoria com nível de expectativa superior (Cat. II), provoca um decréscimo significativo no conforto térmico, considerando uma observação feita para o mesmo edifício.
- As divisões sem vãos envidraçados exteriores ou paredes exteriores expostas à luz solar apresentam valores constantes de temperatura no seu interior, não existindo variação do período diurno para o período noturno, e vice-versa.

II. Ventilação:

- O efeito da ventilação mecânica da cozinha na taxa de renovação de ar do quarto é anulado pelo fecho das portas interiores de cada uma destas divisões.
- O impacto da ventilação cruzada por efeito da ação do vento superiorizou-se relativamente ao efeito da ativação do exaustor mecânico na cozinha, ainda que o vento seja uma variável

inconstante, tanto na sua direção como velocidade, e por isso contraste com o exaustor mecânico, sob o qual existe um maior controlo.

- A condução de exaustão natural no quarto de banho não tem qualquer efeito na ventilação do quarto, e muito provavelmente das divisões adjacentes.
- A abertura da porta interior no local de medição provoca um aumento significativo nos valores da taxa de renovação do ar, devido à dissipação do CO₂ pelas divisões adjacentes.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

As habitações existentes em Portugal têm vindo, em anos recentes, a ser alvo de processos de reconstrução ou remodelação intensos, sendo um dos alvos de melhoria os materiais com influência no conforto térmico e na qualidade do ar interior como caixilharias, janelas, pavimentos ou sistemas AVAC. Ainda assim existe uma enorme quantidade de edificações, e mais especificamente habitações, com condições precárias no que diz respeito aos materiais de isolamento e sistemas de ventilação, sobre as quais num futuro próximo será crucial atuar.

Assim sendo, existem diversas temáticas e considerações com influência no conforto térmico e na qualidade do ar interior que não foram devidamente abordadas e analisadas neste trabalho. Um exemplo é a influência das proteções solares exteriores no conforto térmico, que no caso da habitação estudada incidiria sobre as persianas opacas de cor clara colocadas pelo exterior, ainda que para algumas habitações seja igualmente vantajoso estudar a influência das proteções solares interiores, como por exemplo estores. Ainda do ponto de vista térmico, outra análise produtiva e interessante seria a comparação, para o mesmo edifício, dos dados recolhidos em apartamentos a cotas opostas, através de frações no primeiro e último piso, onde as condições de fronteira são distintas, destacando-se o efeito do aquecimento no último piso por transferência térmica através da cobertura.

Devido ao período de recolha de dados e de estudo da habitação não foi analisado o efeito do sistema de aquecimento a pellets no conforto térmico das divisões por isso para o futuro seria interessante analisar o impacto deste e outros sistemas de aquecimento, como através de ar condicionado, nas habitações, analisando simultaneamente as implicações dos diferentes métodos de aquecimento na concentração de CO₂ interior.

Relativamente à qualidade do ar interior e ao estudo do caudal de renovação do ar interior seria importante analisar o efeito da altitude do apartamento nos valores obtidos para a taxa de renovação de ar interior, através do estudo do efeito da ação do vento em aberturas com a mesma orientação. Ainda relativamente à ventilação no interior da habitação faltou efetuar uma comparação, para a mesma divisão, do ritmo de renovação do ar interior numa situação em que a porta interior da divisão de medição permaneça aberta e numa situação idêntica em que esta porta interior permaneça fechada, tudo isto num cenário em todas as aberturas exteriores permanecessem fechadas e o exaustor mecânico da cozinha desligado. Sobre a ventilação mecânica na cozinha faltou efetuar uma análise ao impacto da alteração do modo de funcionamento do exaustor, visto que este é dotado de três ritmos de exaustão distintos e para este trabalho todos os ensaios relativos ao exaustor mecânico foram realizados no modo de exaustão mais elevada.

Para analisar a influência da ventilação nas condições higrotérmicas poderia ter sido calculado o caudal de renovação de ar no quarto de banho em períodos de banho, altura em que são atingidos os valores máximos de humidade do ar na divisão, comparando posteriormente esses valores com dados recolhidos para a mesma situação, mas com a abertura da porta interior do quarto de banho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ADENE, “Saiba Mais Sobre Sistemas de Ventilação,” 2016. [Online]. Available: <https://www.sce.pt/>. [Acedido em 11 Março 2021].
- [2] [Online]. Available: <https://greenhome.osu.edu/>. [Acedido em 20 março 2021].
- [3] Instituto Português da Qualidade, NP 1037-1, 2002.
- [4] [Online]. Available: <https://www.cppwind.com/>. [Acedido em 13 março 2021].
- [5] M. R. C.-B. Santos, *Ventilação natural e comportamento térmico de edifícios. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa*, 2017.
- [6] B. C. L. Carneiro, *Avaliação dos Sistemas de Ventilação Implementados em Diferentes Edifícios. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*, 2015.
- [7] M. W. Liddament, *A Guide to Energy Efficient Ventilation*, Peter Wouters (INIVE EEIG), 1996.
- [8] M. A. d. A. Peneda, *Recomendações Para o Projecto de Sistemas de Ventilação Mista em Edifícios de Habitação. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*, 2013.
- [9] J. C. Viegas e A. Pinto, “Ventilação natural e mista em edifícios,” 2006. [Online]. Available: <http://jornadas2012.lnec.pt/>. [Acedido em 16 março 2021].
- [10] F. Durier, R. Carrié e M. Sherman, “What is Smart Ventilation?,” 2018. [Online]. Available: <https://www.aivc.org/>. [Acedido em 10 Março 2021].
- [11] P. Wellener, J. Michalik, H. A. Manolian e G. James, “Smart buildings: Four considerations for creating people-centered smart, digital workplaces,” 2018. [Online]. Available: <https://www2.deloitte.com/>. [Acedido em 2 março 2021].
- [12] “Centers for Disease Control and Prevention,” [Online]. Available: <https://www.cdc.gov/>. [Acedido em 12 Março 2021].
- [13] N. E. Klepeis, W. C. Nelson, W. R. Ott, J. P. Robinson, A. M. Tsang, P. Switzer, J. V. Behar, S. C. Hern e W. H. Engelmann, “The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS) : A Resource for Assessing Exposure to Environmental Pollutants,” *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, vol. 11, n° 3, pp. 231-252, 2001.
- [14] World Health Organization, [Online]. Available: <https://www.who.int/>. [Acedido em 17 Março 2021].
- [15] A. M. B. Teixeira, *Impacto da Norma de Conforto Europeia EN 15251 na certificação energética em edifícios de serviços. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*, 2009.
- [16] P. Wargocki, “The Effects of Ventilation in Homes on Health,” *International Journal of Ventilation*, vol. 12, n° 2, pp. 101-118, 2013.

- [17] Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, *Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação*, 2013.
- [18] P. O. Fanger, “Olf and decipol. The new units for perceived air quality,” *Klimaatbeheersing*, vol. 17, nº 2, pp. 38-41, 1988.
- [19] C. A. Eckelman, *The Shrinking and Swelling of Wood and Its Effect on Furniture*, FNR 163, nº 163, 1998.
- [20] M. Amaral, *Sistemas de Ventilação Natural e Mistos em Edifícios de Habitação. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*, 2008.
- [21] W. Borsboom, W. D. Gids, J. Logue e M. H. Sherman, “Residential Ventilation and Health,” [Online]. Available: <https://www.aivc.org/>. [Acedido em 14 março 2021].
- [22] J. M. Ferreira, *Avaliação Experimental e Numérica das Condições Higrotérmicas de Edifícios Residenciais no Arquipélago dos Açores. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra*, 2018.
- [23] M. Tajima, T. Inoue e Y. Ohnishi, “Derivation of equation for personal carbon dioxide in exhaled breath intended to estimation of building ventilation,” 2014. [Online]. Available: <https://www.aivc.org/>. [Acedido em 18 março 2021].
- [24] ANSI/ASHRAE, *Standard 55*, 2004.
- [25] Z. Lin e S. Deng, “A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics—developing a thermal comfort model for sleeping environments,” *Building and Environment*, vol. 43, nº 1, pp. 70-81, 2008.
- [26] T. M. Gonçalves, *Conforto Térmico no Interior de Edifícios. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra*, 2017.
- [27] H. Simões e M. Talaia, “Índices PMV e PPD na definição da "performance" de um ambiente,” 2009. [Online]. Available: <https://www.riscos.pt/>. [Acedido em 19 março 2021].
- [28] H. S. Almeida, *Análise do conforto térmico de edifícios utilizando as abordagens analítica e adaptativa. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa*, 2010.
- [29] European Committee for Standardization, “EN15251,” *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings-addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*, 2007.
- [30] ANSI/ASHRAE, *Standard 55*, 2013.
- [31] P. O. Fanger, *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*, New York: McGraw-Hill, 1972.
- [32] International Organization of Standardization, *ISO 7730*, 2005.
- [33] I. M. Tavares, *Avaliação de ambiente frio e sensação térmica de trabalhadores: estudo de caso numa empresa de bacalhau. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro*, 2014.

- [34] International Organization for Standardization, *ISO 13788*, 2012.
- [35] F. Nicol e L. Pagliano, “Allowing for thermal comfort in free-running buildings in the new European Standard EN15251,” [Online]. Available: <https://www.aivc.org/>. [Acedido em 4 abril 2021].
- [36] G. S. Brager e R. D. Dear, *Climate, comfort, & natural ventilation: a new adaptive comfort standard for ASHRAE standard 55*. Oxford Brookes University, 2001.
- [37] A. J. C. Curado, *Conforto térmico e eficiência energética nos edifícios de habitação social reabilitados*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014.
- [38] [Online]. Available: www.google.pt/maps/. [Acedido em 12 Abril 2021].
- [39] “Instituto Português do Mar e da Atmosfera,” [Online]. Available: <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/>. [Acedido em 10 Maio 2021].
- [40] [Online]. Available: weatherspark.com. [Acedido em 17 Abril 2021].
- [41] [Online]. Available: <http://portaldoclima.pt/>. [Acedido em 19 Abril 2021].