FACULDADE de ENGENHARIA da UNIVERSIDADE do PORTO

SISTEMAS DE VENTILAÇÃO NATURAL E MISTOS EM EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO

Manuel António Pinto da Silva Amaral

Mestre em Construção de Edifícios pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação submetida para obtenção do grau de Doutor
em Engenharia Civil pela
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Orientador: Prof. Doutor Vasco Manuel Araújo Peixoto de Freitas

SETEMBRO 2008

Dedicatória

À Madalena,
ao Miguel e à Beatriz

AGRADECIMENTOS

Ao terminar este trabalho, o autor reconhece que, sem a prestimosa colaboração de um pequeno grupo de pessoas, este não seria possível. Cada um com o seu saber, disponibilidade, incentivo, contribuiu de uma forma decisiva para esta pequena "vitória". Assim, este trabalho pertence de uma forma implícita a todos eles.

É com prazer que, expressamente, quero aqui manifestar o meu sincero agradecimento e gratidão pelo apoio recebido a todos e muito particularmente:

- ao Prof. Vasco Freitas, orientador desta tese, pelo entusiasmo que sempre demonstrou, pela permanente disponibilidade e pelos conhecimentos que tão sabiamente soube transmitir;
- aos colegas da Escola Superior de Tecnologia de Viseu (ESTV), em especial ao Eng.º António Oliveira, pelos contributos que permitiram "incrementar" a qualidade do trabalho apresentado;
- ao Conselho Directivo da ESTV, que, pela disponibilidade financeira, permitiu adquirir alguns equipamentos utilizados no âmbito desta tese;
- aos investigadores e técnicos dos departamentos de Edifícios e Estruturas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), os quais realizaram a caracterização experimental de componentes, obtiveram os coeficientes de pressão do edifício ensaiado, efectuaram a calibração de equipamentos, disponibilizaram equipamentos e auxiliaram a realização *in situ* de alguns ensaios;
- às entidades que tornaram possível este estudo, contribuindo de múltiplas formas: Ferreira Construções, France-air Portugal, Fundação para a Ciência e Tecnologia,

Instituto da Habitação e Reabilitação Urbana, Câmaras Municipais da Maia e Gondomar e Pentiaq AB - Suécia;

- às instituições universitárias pelo apoio experimental: Universidade de Gävle (Dept. of Technology and Built Environment - Suécia), nas pessoas dos Prof.s Mats Sandberg e Hans Stymne, Laboratório de Física das Construções (LFC-FEUP) e Instituto de Engenharia Mecânica (IDMEC-FEUP);
- aos Eng.os João Viegas, Marques da Silva, Prof. Clito Afonso e P.e Manuel Chaves, pelo incansável trabalho de revisão do texto e pelas prestimosas críticas e sugestões;
- a todas as pessoas que de uma forma ou outra prestaram o seu apoio ao autor, na execução do texto, na elaboração gráfica e no aconselhamento técnico;
- finalmente a todos os amigos e familiares que adoçam a vida, de tal forma que as dificuldades nos parecem menos agrestes.

A todos:

Que Deus os "recompense"

RESUMO

A qualidade do ambiente interior de edifícios é uma preocupação que acompanha o Homem desde há séculos. Contudo, o aumento do tempo de permanência em edifícios (cerca de 90% das nossas vidas acontece no seu interior) e as novas práticas construtivas, geradoras de potenciais deficiências de carácter higrotérmico, têm vindo a provocar um crescente interesse por esta problemática. A publicação da recente regulamentação portuguesa na área da térmica de edifícios e qualidade do ar veio incrementar os níveis de exigência relativamente ao comportamento higrotérmico da envolvente dos edifícios e as condições de ventilação do ar interior.

Em Portugal a maioria dos edifícios de habitação recorre a um sistema de ventilação misto (ventilação mecânica na cozinha e ventilação natural na instalação sanitária). Em face dos potenciais problemas apresentados por este sistema, nomeadamente, a sua intermitência e a possibilidade de inversão de fluxo nas condutas com ventilação natural, levou à prossecução do presente trabalho de investigação que tem como objectivo principal medir o desempenho de um sistema misto de ventilação e propor recomendações práticas.

A vasta campanha experimental realizada permitiu realizar, nomeadamente, a caracterização experimental dos dispositivos usados no sistema de ventilação ensaiado e a aplicação do método do gás traçador, com especial ênfase na técnica PFT, ao estudo das renovações horárias do sistema de ventilação proposto. A execução do trabalho

experimental permitiu definir exigências de ventilação adaptadas às condições reais do clima interior dos edifícios portugueses e estabelecer regras claras a cumprir por um projecto de ventilação, de forma a satisfazer essas exigências.

Palavras-chave:

Ventilação; Habitação; Renovações Horárias (*RPH*); Gás Traçador; Técnica PFT; Técnica do Declive; Sistema Misto de Ventilação.

.

ABSTRACT

Air quality inside buildings has been a human concern for centuries. Nevertheless, the increased permanence within buildings (approximately 90% of our lives take place indoors) and new building practices, which generate potential hygrothermal deficiencies, have motivated increase interest in this area. The publication of recent Portuguese regulations regarding heating in buildings and air quality has increased the standard regarding hygrothermal behaviour in buildings and the conditions of indoor ventilation.

Most residential dwellings in Portugal use a mixed ventilation system (mechanical ventilation in the kitchen and natural ventilation in the bathroom). The potential problems this system presents, namely its intermittent nature and the possibility of reverse flow in the natural ventilation conduits) led to this work. Its main purpose is to measure the performance of a mixed ventilation system and to propose practical recommendations.

The vast experimental campaign carried out accomplished a variety of actions in the study of the hourly renewal rates of the proposed ventilation system, namely the experimental characterization of the devices used in the ventilation system trialed and the application of the tracer gas method, with a special emphasis on the PFT technique. The experimental work made it possible to define ventilation demands adapted to the real indoor climate

conditions of Portuguese buildings and to establish clear rules that must be followed in a ventilation plan so as to meet those demands.

Key words:

Ventilation; Dwelling; Air Change Rate (*ACH*); Tracer Gas; PFT Technique; Decay Technique; Mixed Ventilation System.

RESUMÉ

La qualité de l'environnement à l'intérieur des immeubles est une préoccupation qui accompagne l'Homme depuis des siècles. Cependant, le fait que l'on reste plus longtemps à l'intérieur des immeubles (environ 90 % de nos vies se passent à l'intérieur de ces espaces), ainsi que les nouvelles techniques de construction - qui peuvent engendrer des défaillances à caractère hygrothermique, encouragent de plus en plus l'intérêt envers cette problématique. La récente publication de la règlementation portugaise dans le cadre de la thermique des immeubles et de la qualité de l'air est venue intensifier les niveaux d'exigences par rapport au comportement hygrothermique du milieu environnant des immeubles et des conditions de ventilation de l'air à l'intérieur.

Au Portugal, la plupart des immeubles consacrés au logement fait appel à un système de ventilation mixte (ventilation mécanique dans la cuisine et ventilation naturelle dans les toilettes). Tenant compte des potentiels problèmes qui découlent de ce système, notamment son intermittence et la possibilité d'inversion du flux dans les gaines à ventilation naturelle, la présente recherche a pour but principal de mesurer la performance d'un système mixte de ventilation, et de proposer des recommandations pratiques.

La vaste campagne expérimentale réalisée a permis, entre autres, de mettre en œuvre la caractérisation expérimentale des dispositifs utilisés par le système de ventilation testé et l'application de la méthode par traceur, surtout la méthode PFT, à l'étude des

renouvellements horaires du système de ventilation proposé. La mise en œuvre de ce travail expérimental a permis de définir des exigences de ventilation adaptées aux conditions réelles du climat à l'intérieur des immeubles portugais, et d'établir des règles bien définies à respecter par un projet de ventilation, afin de remplir ces exigences.

Mots-clés:

Ventilation; Logement; Taux de Renouvellement Horaire (*TRH*); Méthode par Traceur; Méthode PFT; Technique du Plan Incliné; Système Mixte de Ventilation.

ÍNDICE

1. Introdução 1
1.1. Considerações iniciais 1
1.2. Objectivos do trabalho 2
1.3. Organização e estruturação do texto 4
2. Qualidade do Ambiente Interior em Edificios de Habitação 7
2.1. Enquadramento 7
2.2. Qualidade do ar interior 8
2.2.1. Critérios de qualidade do ar 8
2.2.2. Efeitos sensoriais dos poluentes 11
2.2.3. Qualidade do ar em edifícios habitacionais 13
2.2.4. Fontes de poluição do ar interior 15
2.2.4.1. Principais poluentes no interior das habitações 15
2.2.4.2. Actividade humana 16
2.2.4.3. Materiais de construção 20
2.2.4.4. Outras fontes 22
2.3. Ventilação 28
2.4. Conforto térmico 34
2.4.1. Equilibrio térmico e trocas de calor 34
2.4.2. Condições de conforto térmico global 35
2.4.3. Especificação de condições de conforto térmico 37
2.4.4. Desconforto local 40
2.4.5. Modelos adaptativos 42
2.5. Síntese crítica 45
Bibliografia do capítulo 2 47

3. Modelação da Ventilação em Edifícios de Habitação 51
3.1. Mecanismos da ventilação natural 51
3.1.1. O Efeito de chaminé 51
3.1.2. O vento 55
3.2. Escoamento por aberturas 63
3.3. Efeitos combinados 65
3.4. Modelos preditivos 67
3.4.1. Enquadramento 67
3.4.2. Modelos empíricos 68
3.4.2.1. O modelo da BS 5925 69
3.4.2.2. O modelo de Aynsley 71
3.4.2.3. O modelo de De Gidds e Phaff 72
3.4.2.4. O modelo do LNEC 73
3.4.2.5. Outros modelos 74
3.4.3. Modelos multi-zona 75
3.4.4. Modelos tipo zonal 79
3.4.5. Modelos tipo CFD 82
3.5. Acoplamento entre modelos 84
3.6. Síntese crítica 86
Bibliografia do capítulo 3 87

4. Técnicas Experimentais Utilizadas 91
4.1. Objectivo do capítulo 91
4.2. Método do gás traçador 91
4.2.1. Descrição e classificação das técnicas do método do gás traçador 91
4.2.2. Características dos gases traçadores 94
4.2.3. Técnica do declive 97
4.2.4. Técnica da emissão constante 105
4.2.5. Técnica PFT 108
4.2.6. Técnica da concentração constante 118
4.2.7. Análise comparativa - Selecção de uma técnica de medida 120
4.3. Método de pressurização 121

4.4. Análise das potencialidades das técnicas do método do gás traçador.....126
4.4.1. Objectivo 126
4.4.2. Características e condições de ensaio.....127
4.4.3. Resultados obtidos.....130
4.4.4. Conclusões dos ensaios 133
4.5. Síntese crítica 134
Bibliografia do capítulo 4.....135

5. Sistemas de Ventilação Correntemente Usados em Edifícios de Habitação em Portugal 141
5.1. Descrição dos sistemas de ventilação correntemente usados.....141
5.1.1. Sistemas de ventilação natural.....141
5.1.2. Sistemas de ventilação mecânica.....143
5.1.3. Sistemas mistos.....144
5.2. Legislação, normalização e recomendações existentes em Portugal 145
5.3. A implementação dos sistemas e a investigação em Portugal 148
5.4. Síntese crítica 153
Bibliografia do capítulo 5.....155

6. Caracterização Experimental e Optimização de um Sistema de Ventilação Misto em Edifícios de Habitação 157
6.1. Descrição do edifício e respectiva campanha experimental 157
6.1.1. Objectivos e estratégia da campanha experimental.....157
6.1.2. Descrição do edifício e do sistema de ventilação ensaiado.....161
6.2. Ensaios exploratórios utilizando a técnica PFT 168
6.3. Caracterização experimental dos elementos constituintes do sistema ou de elementos construtivos.....171
6.3.1. Ensaios em laboratório 171
6.3.1.1. Desempenho aerodinâmico da grelha auto-regulável de admissão de ar 172
6.3.1.2. Desempenho da janela padrão.....173
6.3.1.3. Desempenho aerodinâmico da grelha de extracção das instalações sanitárias 176

6.3.1.4. Perda de carga e coeficiente de depressão do ventilador estático ... 177
6.3.1.5. Determinação em túnel de vento dos coeficientes de pressão nas fachadas e cobertura ... 179
6.3.2. Ensaios *in situ* ... 183
6.3.2.1. Condições experimentais ... 183
6.3.2.2. Desempenho aerodinâmico das grelhas de admissão de ar ... 184
6.3.2.3. Desempenho aerodinâmico das caixas de estore ... 186
6.3.2.4. Desempenho aerodinâmico das janelas ... 186
6.3.2.5. Desempenho aerodinâmico das grelhas de passagem ... 187
6.3.2.6. Desempenho aerodinâmico das portas ... 189
6.3.2.7. Permeabilidade global dos apartamentos ... 191
6.3.3. Síntese crítica ... 192
6.4. Primeira campanha experimental: Verão de 2005 - apartamentos desocupados ... 194
6.4.1. Objectivo ... 194
6.4.2. Análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica ... 195
6.4.3. Renovações horárias ... 205
6.4.4. Fluxo na instalação sanitária do apartamento 3 ... 210
6.4.5. Síntese crítica da primeira campanha experimental ... 212
6.5. Segunda campanha experimental: Inverno de 2006 - apartamentos desocupados ... 213
6.5.1. Objectivo ... 213
6.5.2. Influência da configuração do sistema de ventilação da instalação sanitária no caudal extraído - estudo de sensibilidade ... 214
6.5.2.1. Objectivo ... 214
6.5.2.2. Situação corrente ... 216
6.5.2.3. Influência do ventilador estático e do aquecimento ambiente ... 217
6.5.2.4. Influência da grelha de extracção ... 219
6.5.2.5. Influência do aquecimento ambiente e do isolamento térmico na conduta ... 221
6.5.2.6. Síntese crítica ... 224
6.5.3. Renovações horárias ... 226
6.5.3.1. Objectivo ... 226

6.5.3.2. Técnica PFT 227
6.5.3.3. Técnica do declive 231
6.5.3.4. Síntese crítica 234
6.5.4. Fluxos nas instalações sanitárias 239
6.5.5. Síntese crítica da segunda campanha experimental 242
6.6. Terceira campanha experimental: Janeiro de 2007 - apartamentos ocupados 243
6.6.1. Objectivo 243
6.6.2. Renovações horárias 245
6.6.3. Concentrações de CO_2 e CO na cozinha de um apartamento 247
6.6.4. Síntese crítica da terceira campanha experimental 248
6.7. Caracterização experimental das condições de conforto 249
6.7.1. Parâmetros avaliados 249
6.7.2. Resultados 250
6.7.2.1. Primeira campanha experimental: Verão de 2005 - apartamentos desocupados 250
6.7.2.2. Segunda campanha experimental: semana de 12 de Janeiro a 19 de Janeiro de 2006 - apartamentos desocupados 254
6.7.2.3. Terceira campanha experimental: Janeiro de 2007 - apartamentos ocupados 257
6.7.3. Síntese crítica das condições de conforto 260
6.8. Síntese crítica global 261
Bibliografia do capítulo 6 269

7. Conclusões 273
7.1. Conclusões principais 273
7.2. Principais recomendações para a concepção de um sistema misto de ventilação 278
7.3. Desenvolvimentos futuros 281

Anexo A. Terminologia A.1
Bibliografia do anexo A A.9

Anexo B. Condições Climáticas Medidas Durante as Três Campanhas Experimentais B.1
B.1. Primeira campanha experimental: Verão de 2005 - apartamentos desocupados B.1

B.2. Segunda campanha experimental: semana de 12 a 19 de Janeiro de 2006 - apartamentos desocupados B.9
B.3. Terceira campanha experimental: Janeiro de 2007 - apartamentos ocupados B.12

Anexo C. Características dos Instrumentos Utilizados C.1

Anexo D. Calibrações D.1
D.1. Calibração dos anemómetros D.1
D.2. Calibração dos termopares e das sondas de humidade relativa e temperatura D.3

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Estimativa das taxas de ventilação correspondentes ao caudal base.....33
Figura 2.2 - Balanço térmico do corpo humano [2.45].....36
Figura 2.3 - *PPD* em função de *PMV* (adaptado de [2.20]).....39
Figura 2.4 - Gama de temperaturas aceitáveis para edifícios ventilados naturalmente (adaptado de [2.20]).....44
Figura 3.1 - Diferença de pressões resultante do efeito de chaminé (adaptado de [3.2]). ...53
Figura 3.2 - Representação da diferença de temperatura entre áreas diferentes (adaptado de [3.5]).....54
Figura 3.3 - Distribuições de pressão resultante da acção do vento (adaptado de [3.6]).....55
Figura 3.4 - Influência da rugosidade do terreno nos perfis do tipo potência da velocidade do vento [3.11].....59
Figura 3.5 - Transposição da velocidade obtida em estações meteorológicas para o local em estudo (adaptado de [3.23]).....61
Figura 3.6 - Distribuição global de pressões como resultado da acção combinada do vento e do efeito de chaminé.....66
Figura 3.7 - Variação de $J(\phi)$ com o ângulo de abertura ϕ, a) janela de abrir, b) janela pivotante (adaptado de [3.27]).....70
Figura 3.8 - Modelo multi-zona (adaptado de [3.26]).....76
Figura 3.9 - Esquema tipo de um modelo zonal [3.58].....81
Figura 3.10 - Fluxograma do acoplamento entre a modelação térmica e de fluxos de ar (adaptado de [3.4]).....84
Figura 3.11 - Acoplamento entre modelos de simulação térmica e CFD (adaptado de [3.71]).....85
Figura 4.1 - Técnica do declive, a) decaimento da concentração do gás traçador, b) gráfico do logaritmo da concentração *versus* tempo (adaptado de [4.1]).....99

Figura 4.2 - Posicionamento dos ventiladores [4.12]. 102
Figura 4.3 - Equipamento tipo usado no método do gás traçador (adaptado de [4.6]).....102
Figura 4.4 - Representação esquemática do princípio de funcionamento do analisador de gases [4.27]. 104
Figura 4.5 - Tempo para se atingir uma concentração de equilíbrio em função do número de renovações horárias (adaptado de [4.1]).....106
Figura 4.6 - Ajustamento da emissão relativa numa cápsula emissora (adaptado de [4.42]). 110
Figura 4.7 - Exemplo de uma cápsula receptora (adaptado de [4.39]). 113
Figura 4.8 - Exemplo de colocação de cápsulas emissoras e receptoras para o caso de uma moradia (adaptado de [4.2]). 114
Figura 4.9 - Princípio da cromatografia gasosa com um detector de captura de electrões (adaptado de [4.2]). 115
Figura 4.10 - Exemplo de porta-ventiladora. 123
Figura 4.11 - Esquema do princípio do método da porta-ventiladora (adaptado de [4.2]). 123
Figura 4.12 - Exemplo de gráfico de permeabilidade ao ar (adaptado de [4.63]). 124
Figura 4.13 - Apartamento estudado - Gävle, a) alçado lateral esquerdo (Sul), b) perspectiva, c) planta.....128
Figura 4.14 - Planta do apartamento com indicação da posição do equipamento usado no método do gás traçador - Gävle. 129
Figura 4.15 - Evolução da concentração de N_2O nos diversos compartimentos no ensaio de 22 de Agosto de 2005 (concentração constante + declive). 131
Figura 4.16 - Evolução dos caudais de ar novo nos diversos compartimentos no ensaio de 22 de Agosto de 2005 (concentração constante).....131
Figura 4.17 - Evolução dos caudais de ar novo nos diversos compartimentos no ensaio de 25 de Agosto de 2005 (caudais descontínuos; concentração constante).....132
Figura 5.1 - Princípio geral de funcionamento de um sistema de ventilação natural: ventilação conjunta [5.10]. 142
Figura 5.2 - Princípio geral de funcionamento de um sistema de ventilação VMC com admissão de ar na fachada [5.1]. 144

Figura 5.3 - Princípio geral de funcionamento de um sistema de ventilação misto. 144
Figura 6.1 - Vista parcial do empreendimento seleccionado. 161
Figura 6.2 - Empreendimento contendo os sete apartamentos ensaiados [6.7], [6.8].....166
Figura 6.3 - Princípio de funcionamento do sistema de ventilação implementado - sistema misto [6.7], [6.8].....166
Figura 6.4 - Dispositivos implementados. 167
Figura 6.5 - Alçados do edifício com indicação do apartamento ensaiado - Maia. 169
Figura 6.6 - Planta do apartamento com indicação da posição do equipamento usado - Maia.....170
Figura 6.7 - Desempenho aerodinâmico da grelha auto-regulável. 172
Figura 6.8 - Análise comparativa entre os desempenhos da grelha auto-regulável. 173
Figura 6.9 - Permeabilidade em função da área total (depressão). 174
Figura 6.10 - Permeabilidade em função do comprimento da junta móvel (depressão)....174
Figura 6.11 - Configuração típica da grelha de extracção das instalações sanitárias. 176
Figura 6.12 - Desempenho aerodinâmico das grelhas de extracção da instalação sanitária. 177
Figura 6.13 - Ensaio do ventilador estático. Determinação do coeficiente de depressão para vento na direcção horizontal. 178
Figura 6.14 - Análise comparativa do coeficiente de depressão do ventilador estático. ...179
Figura 6.15 - Modelo da urbanização no túnel de vento.....179
Figura 6.16 - Rosa-dos-ventos e distribuição da velocidade média do vento por rumo para a Serra do Pilar [6.20]. 180
Figura 6.17 - Distribuição pontual de C_p (a preto) e contínua na fachada principal (a cores); distribuição pontual de C_p na fachada posterior (a amarelo). Edifício central, assinalado na figura inferior, para a incidência de 90º [6.20]. 181
Figura 6.18 - Distribuição pontual de C_p na cobertura para o edifício central, assinalado na planta inferior, para a incidência de 270º [6.20]. 182
Figura 6.19 - Permeabilidade das grelhas auto-reguláveis (7 de Março de 2006).....184
Figura 6.20 - Análise comparativa da permeabilidade de uma grelha auto-regulável (depressão, comparação para o dia 7 de Março de 2006). 185

Figura 6.21 - Análise comparativa da permeabilidade da janela dos quartos, em laboratório, e da janela da sala, *in situ* (comparação para o dia 7 de Março de 2006). 187
Figura 6.22 - Análise comparativa da permeabilidade da grelha de passagem aplicada nas portas da cozinha e instalação sanitária (depressão, comparação para o dia 16 de Fevereiro de 2006).....189
Figura 6.23 - Distribuição da permeabilidade nos apartamentos 1 e 3 (ensaios em pressão). 192
Figura 6.24 - 1.ª campanha: análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica. Caudais e velocidade do vento para os ensaios com exaustor desactivado e esquentador activado (ventilação natural). 198
Figura 6.25 - 1.ª campanha: análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica. Caudais e velocidade do vento para o ensaio com exaustão mecânica (tudo fechado). 199
Figura 6.26 - 1.ª campanha: análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica. Caudais e temperatura do esquentador para o ensaio com exaustão mecânica (tudo fechado). 200
Figura 6.27 - 1.ª campanha: análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica. Caudais e velocidade do vento para os ensaios com exaustão mecânica (tudo aberto).....201
Figura 6.28 - 1.ª campanha: análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica. Caudais e velocidade do vento para o ensaio com exaustor e esquentador desactivados (ventilação natural).....203
Figura 6.29 - 1.ª campanha: determinação das renovações horárias. Planta do apartamento tipo com indicação da posição do equipamento usado na técnica PFT. 207
Figura 6.30 - 1.ª campanha: determinação das renovações horárias. Técnica PFT. 208
Figura 6.31 - 1.ª campanha: fluxo na instalação sanitária do apartamento 3. Caudal, velocidade e direcção do vento. 211
Figura 6.32 - 1.ª campanha: fluxo na instalação sanitária do apartamento 3. Temperatura interior, na conduta e no exterior. 211
Figura 6.33 - 2.ª campanha: estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Situação corrente. Caudais, velocidade e direcção do vento.....217

Figura 6.34 - 2.ª campanha: estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Situação sem grelhas de extracção. Caudais, velocidade e direcção do vento. 218
Figura 6.35 - 2.ª campanha: estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Situação sem grelhas de extracção e com aquecimento ambiente. Caudais, velocidade e direcção do vento. 219
Figura 6.36 - 2.ª campanha: estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Situação sem ventilador estático. Caudais, velocidade e direcção do vento. 220
Figura 6.37 - 2.ª campanha: estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Situação sem grelha na conduta normal. Caudais, velocidade e direcção do vento. 221
Figura 6.38 - 2.ª campanha: estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Situação com aquecimento ambiente. Caudais, velocidade e direcção do vento. 222
Figura 6.39 - 2.ª campanha: estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Situação com aquecimento ambiente. Temperaturas: exterior, na instalação sanitária e no interior das condutas. 223
Figura 6.40 - 2.ª campanha: estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Situação sem aquecimento ambiente. Temperaturas: exterior, na instalação sanitária e no interior das condutas. 223
Figura 6.41 - 2.ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica PFT (semana 2). 228
Figura 6.42 - 2.ª campanha: determinação das renovações horárias. Planta do apartamento tipo com indicação da posição do equipamento usado na técnica do declive. 232
Figura 6.43 - 2.ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica do declive. Ensaio no apartamento 6. 232
Figura 6.44 - 2.ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica do declive. Correlação com a velocidade do vento. 234

Figura 6.45 - Determinação das renovações horárias pela técnica PFT. Renovações horárias das instalações sanitárias. Comparação de resultados entre as duas primeiras campanhas. 235
Figura 6.46 - Determinação das renovações horárias pela técnica PFT. Renovações horárias das cozinhas. Comparação de resultados entre as duas primeiras campanhas. 236
Figura 6.47 - Determinação das renovações horárias pela técnica PFT. Renovações horárias globais. Comparação de resultados entre as duas primeiras campanhas. 236
Figura 6.48 - 2ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica PFT. Caudais obtidos na instalação sanitária e cozinha do apartamento 3, entre os dias 19 e 20 de Janeiro. 240
Figura 6.49 - 2ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica PFT. Caudais obtidos nas instalações sanitárias dos apartamentos 1 e 2, entre os dias 12 e 14 de Janeiro. 241
Figura 6.50 - 3.ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica PFT. Apartamentos do tipo T3 (apartamentos 6 e 7). 244
Figura 6.51 - 3.ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica PFT. 246
Figura 6.52 - 3.ª campanha: concentrações de CO_2 e CO na cozinha de um apartamento, entre os dias 13 e 17 de Janeiro. 247
Figura 6.53 - 1.ª campanha: temperatura em cada apartamento entre os dias 3 e 6 de Agosto. 250
Figura 6.54 - 1.ª campanha: humidade relativa em cada apartamento entre os dias 3 e 6 de Agosto. 250
Figura 6.55 - 1.ª campanha: temperaturas dos compartimentos no apartamento 5 nos dias 2 e 3 de Agosto. 252
Figura 6.56 - 1.ª campanha: temperaturas superficiais do quarto 1 no apartamento 5 nos dias 2 e 3 de Agosto. 252
Figura 6.57 - 2.ª campanha: temperatura em cada apartamento entre os dias 13 e 16 de Janeiro. 255
Figura 6.58 - 2.ª campanha: temperaturas dos compartimentos no apartamento 2 entre os dias 13 a 16 de Janeiro. 256

Figura 6.59 - 2.ª campanha: temperaturas superficiais do quarto 1 no apartamento 2 entre os dias 13 e 16 de Janeiro.....256
Figura 6.60 - 3.ª campanha: temperatura em cada apartamento entre os dias 13 e 16 de Janeiro. 257
Figura 6.61 - 3.ª campanha: humidade relativa em cada apartamento entre os dias 13 e 16 de Janeiro. 258
Figura 6.62 - 3.ª campanha: temperaturas dos compartimentos no apartamento 5 entre os dias 13 a 16 de Janeiro. 258
Figura 6.63 - 3.ª campanha: humidade relativa dos compartimentos no apartamento 5 entre os dias 13 a 16 de Janeiro.....259
Figura 6.64 - 3.ª campanha: CO_2 e temperatura ambiente na cozinha de um apartamento entre os dias 13 e 17 de Janeiro.....259
Figura 6.65 - 3.ª campanha: CO_2 e humidade relativa na cozinha de um apartamento entre os dias 13 e 17 de Janeiro.....260
Figura 6.66 - Comparação de resultados entre as 3 campanhas nas instalações sanitárias. 264
Figura 6.67 - Comparação de resultados entre as 3 campanhas nas cozinhas. 265
Figura 6.68 - Comparação de resultados entre as 3 campanhas. Renovações horárias globais. 265

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Concentrações máximas de referência de poluentes no interior dos edifícios [2.9]. 11
Quadro 2.2 - Relação entre os níveis de qualidade do ar e a concentração de CO_2 acima da concentração exterior (adaptado de [2.7] e [2.11]). 13
Quadro 2.3 - Grau de importância de alguns poluentes nos compartimentos de uma habitação (adaptado de [2.16]). 15
Quadro 2.4 - Poluição provocada pelos ocupantes humanos (adaptado de [2.3] e [2.17]).. 16
Quadro 2.5 - Massa de vapor de vapor de água libertada em actividades domésticas (adaptado de [2.3] e [2.17]). 17
Quadro 2.6 - Produção de vapor de água e de dióxido de carbono resultante da combustão (adaptado de [2.3] e [2.17]). 18
Quadro 2.7 - Níveis das populações, em relação ao exterior, de fungos e bactérias em habitações (adaptado de [2.30]). 25
Quadro 2.8 - Lista das principais substâncias poluentes no interior, fontes e rácio concentração interior *versus* concentração exterior (adaptado de [2.10]). 25
Quadro 2.9 - Alguns resultados do programa HOPE (*Health Optimisation Protocol for Energy-Efficient Buildings*) em apartamentos (adaptado de [2.35] e [2.36]). 27
Quadro 2.10 - Resumo de prescrições de ventilação para edifícios habitacionais (adaptado de [2.4], [2.7], [2.8], [2.9], [2.15], [2.21], [2.41] e [2.42]). 31
Quadro 2.11 - Dimensões das diferentes tipologias consideradas na análise comparativa. 33
Quadro 2.12 - Escala de sensação térmica [2.46]. 38
Quadro 2.13 - Categorias de ambiente térmico global [2.46]. 39
Quadro 2.14 - Categorias de ambiente térmico local (adaptado de [2.46]). 42

Quadro 3.1 - Valores da espessura da camada limite e expoente do perfil do tipo potência (adaptado de [3.11]). 60
Quadro 3.2 - Valores da escala de rugosidade, Z_0, referentes a diferentes tipos de terreno [3.11]. 61
Quadro 3.3 - Fórmulas para ventilação com uma só fachada (adaptado de [3.27]). 70
Quadro 3.4 - Fórmulas para ventilação cruzada (adaptado de [3.27]). 71
Quadro 3.5 - Comparação relativa dos resultados de alguns modelos empíricos [3.1]. 75
Quadro 4.1 - Técnicas utilizadas (adaptado de [4.2] e [4.6]). 94
Quadro 4.2 - Propriedades dos gases mais frequentemente usados (adaptado de [4.2], [4.8] e [4.9]). 96
Quadro 4.3 - Qualidade de alguns gases (adaptado de [4.2]). 96
Quadro 4.4 - Estudos internacionais recorrendo à técnica PFT [4.46]. 116
Quadro 4.5 - Técnicas para a determinação das renovações horárias ou do caudal de ar exterior (adaptado de [4.2]). 121
Quadro 4.6 - Características do apartamento e do sistema de ventilação - Gävle. 127
Quadro 4.7 - Descrição dos ensaios e respectivos resultados - Gävle. 132
Quadro 5.1 - Sistema de ventilação previsto em projecto, segundo o tipo de edifício (adaptado de [5.20]). 149
Quadro 5.2 - Análise comparativa das vantagens e inconvenientes dos sistemas de ventilação usados correntemente em edifícios de habitação [5.26]. 152
Quadro 6.1 - Resumo dos ensaios efectuados. 160
Quadro 6.2 - Dimensionamento do sistema de ventilação dos apartamentos tipo T2, segundo a NP 1037-1: 2002 - Gondomar. 163
Quadro 6.3 - Características dos sistemas de ventilação implementados. 168
Quadro 6.4 - Características do edifício e do sistema de ventilação. 169
Quadro 6.5 - *RPH* no apartamento e respectivas condições climáticas. 171
Quadro 6.6 - Permeabilidade da janela padrão. 175
Quadro 6.7 - Resumo das classificações dos ensaios aplicados à janela padrão. 175
Quadro 6.8 - Permeabilidade das grelhas auto-reguláveis. 185
Quadro 6.9 - Permeabilidade das caixas de estores. 186
Quadro 6.10 - Permeabilidade das janelas. 186

Quadro 6.11 - Permeabilidade da grelha aplicada na porta exterior da cozinha.....188
Quadro 6.12 - Permeabilidade da grelha de passagem aplicada nas portas da cozinha e instalação sanitária. 188
Quadro 6.13 - Permeabilidade das portas interiores aos apartamentos (quartos e cozinha). 189
Quadro 6.14 - Permeabilidade da porta exterior do apartamento. 190
Quadro 6.15 - Permeabilidade da porta exterior da cozinha.....190
Quadro 6.16 - Permeabilidade global dos apartamentos. 191
Quadro 6.17 - 1.ª campanha: análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica. Resumo dos ensaios efectuados. 196
Quadro 6.18 - 1.ª campanha: análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica. Ensaio com exaustor desactivado e esquentador activado (ventilação natural).....196
Quadro 6.19 - 1.ª campanha: análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica. Condições do ensaio com exaustão mecânica (tudo fechado).....198
Quadro 6.20 - 1.ª campanha: análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica. Condições dos ensaios com exaustão mecânica (tudo aberto).....200
Quadro 6.21 - 1.ª campanha: análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica. Ensaio com exaustor e esquentador desactivados (ventilação natural).....202
Quadro 6.22 - 1.ª campanha: determinação das renovações horárias. Características da exaustão da cozinha dos sistemas de ventilação implementados.....206
Quadro 6.23 - 1.ª campanha: determinação das renovações horárias. Renovações horárias globais e caudais extraídos.....209
Quadro 6.24 - 2.ª campanha: características da exaustão da cozinha dos sistemas de ventilação implementados.....213
Quadro 6.25 - Estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Resumo dos ensaios efectuados. 215
Quadro 6.26 - 2.ª campanha: estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Resultados da situação corrente.....216

Quadro 6.27 - 2.ª campanha: estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Resultados dos ensaios sem grelhas de extracção. 218
Quadro 6.28 - 2.ª campanha: estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Resultados dos ensaios relativos à influência das grelhas. 220
Quadro 6.29 - 2.ª campanha: estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Resultados na situação de aquecimento ambiente. 222
Quadro 6.30 - 2.ª campanha: determinação das renovações horárias. Planeamento geral dos ensaios. 227
Quadro 6.31 - 2.ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica PFT (semana 2). Renovações horárias globais e caudais extraídos. 229
Quadro 6.32 - 2ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica PFT. Resultados da segunda campanha. 230
Quadro 6.33 - 2ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica do declive. Comparação com a técnica PFT. 233
Quadro 6.34 - Condições climáticas durante as primeiras duas campanhas de medição pela técnica PFT. 235
Quadro 6.35 - 2ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica PFT. Caudais obtidos nas instalações sanitárias. 241
Quadro 6.36 - 3.ª campanha. Determinação das renovações horárias pela técnica PFT. Residentes por apartamento e respectiva idade. 245
Quadro 6.37 - 1.ª campanha: resultados dos ensaios de conforto térmico. 253

SIMBOLOGIA

Alfabeto latino

Símbolo	Designação	Unidade
A	área da abertura perpendicular ao escoamento área da superfície área de uma abertura ou frincha superfície do corpo	m^2
C	coeficiente de escoamento	$m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot Pa^{-n}$
	trocas convectivas com as camadas de ar circundantes	W/m^2
C_d	coeficiente de descarga	-
C_p	coeficiente de pressão	-
C_1	coeficiente adimensional dependente do vento	-
C_2	constante de fronteira	-
C_3	constante de turbulência	-
c	concentração do gás traçador	-(ppm)
	concentração do poluente	-(ppm)
c_p	calor específico a pressão constante	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
DR	taxa de corrente de ar (*Draught Risk)*	-(%)
d	deslocamento do plano de referência	m
E	energia	J
	perdas por evaporação devido à transpiração	W/m^2
G	emissão de CO_2	l/s
g	aceleração da gravidade	m/s^2
H	altura de uma abertura	m
HR	humidade relativa	-(%)
h	altura dos edifícios	m
	altura de uma grelha/porta/janela	m

Símbolo	Designação	Unidade
	distância na vertical	m
h_c	coeficiente de convecção	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
I_{CL}	resistência térmica convencional do vestuário	clo
$J(\phi)$	factor que afecta a área de abertura de uma janela	-
K	condução de ou para o vestuário	W/m^2
k	energia cinética turbulenta	J/kg
l	largura de uma grelha/porta/janela	m
M	produção de calor metabólico	W/m^2
M_p	quantidade de gás traçador recolhida nas cápsulas receptoras	g
N	constante referente à estimativa da renovação horária média anual	-
n	nós pontos zonas número de registos temporalmente distintos	-
PD	percentagem de insatisfeitos (*Percentage Dissatisfied*)	-(%)
PMV	voto médio previsível (*Predicted Mean Vote*)	-
PPD	percentagem previsível de insatisfeitos (*Predicted Percentage Dissatisfied*)	-(%)
p	pressão	Pa
p_v	pressão parcial do vapor de água	Pa
q	caudal caudal volúmico de ar exterior	m^3/s; m^3/h; kg/s; l/s
R	constante molar do gás ideal	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
	trocas de radiação com as superfícies envolventes	W/m^2
RPH	renovação horária taxa de ventilação específica	h^{-1}
RPH_{local}	taxa local de ventilação específica	h^{-1}
Res	trocas de calor sensível e latente na respiração	W/m^2
S	acumulação de calor no corpo	W/m^2
s	caudal volúmico emitido pelo poluente	l/s
	caudal volúmico de gás injectado	m^3/s
	incerteza relativa total	-(%)
s/V	taxa de emissão homogénea, proporcional ao volume, do gás traçador	$g/h \cdot m^3$

Símbolo	Designação	Unidade
T	temperatura	ºC; K
	técnica do gás traçador	-
T_u	intensidade da turbulência local	-(%)
t	tempo	h
	tempo de ensaio	h
V	volume efectivo da zona	m^3
U	teor de humidade do ar	kg/kg
	velocidade do vento	m/s
v	velocidade	m/s
	velocidade relativa	m/s
Z_0	escala de rugosidade	cm
z	cota	m
W	trabalho mecânico exterior	W/m^2

Alfabeto grego

Símbolo	Designação	Unidade
α	constante da lei quadrática do escoamento por uma abertura	-
β	coeficiente de expansão volumétrico	K^{-1}
	constante da lei quadrática do escoamento por uma abertura	-
ΔC_p	diferença entre coeficientes de pressão	-
Δp	diferença de pressão	Pa
ΔT	diferença de temperatura	K; ºC
$\Delta \rho$	diferença de massa volúmica	kg/m^3
δ	espessura da camada limite	m
ε	quociente entre áreas	-
	taxa de dissipação da energia cinética turbulenta	m^2/s^3
ζ	coeficiente de perda de carga	-
κ	taxa de recolha	m^3/h
μ	viscosidade dinâmica	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
ρ	massa volúmica	kg/m^3
τ	idade média do ar	h
τ_n	constante de tempo nominal	s; h
ϕ	ângulo de abertura de uma janela	-
	diâmetro	mm

Símbolo	Designação	Unidade
	fluxo de calor	W
ω	produção de vapor no interior de um local	kg/s

Índices inferiores

Símbolo	Designação
análise	referente à incerteza relativa da análise do gás traçador
ar	referente ao ar
conc constante (ar novo)	referente ao caudal de ar novo obtido pela técnica da concentração constante
cozinha	referente à cozinha
declive	referente à técnica do declive
dep	referente ao caudal obtido em depressão
e	referente à entrada referente ao exterior
ec	referente ao efeito de chaminé
ef	referente à velocidade efectiva
emi const	referente ao caudal de ar novo total obtido pela técnica da emissão constante
emissão	referente à incerteza relativa da emissão do gás traçador
eq	referente à área equivalente
estimada	referente à renovação horária estimada no espaço em estudo
ext cozinha	referente ao caudal extraído na cozinha
ext inst sanit	referente ao caudal extraído na instalação sanitária
ext total	referente ao caudal extraído total
ext vent mecânica	referente ao caudal extraído pelo sistema de ventilação mecânica
fonte	referente ao caudal/energia gerado em cada zona
global	referente à renovação horária global
homogeneização	referente à incerteza relativa de qualquer desvio da emissão homogénea que possa ocorrer no edifício
i	referente ao interior referente a um local referente a uma zona referente a índice de somatório

Símbolo	Designação
inf	referente ao caudal de infiltrações ou de ventilação natural
int-ext	referente à diferença entre o interior e o exterior
int-lab	referente à diferença média entre o interior e o laboratório
j	referente a uma zona
l	referente a um local
máxima	referente ao valor máximo
média	referente à altura média dos edifícios referente ao valor médio
média anual	referente à renovação horária média anual
média exterior	referente à média exterior
média interior	referente à média interior
met	referente a uma estação meteorológica
mínima	referente ao valor mínimo
mr	referente à temperatura média radiante
objecto	referente à concentração (constante) obtida pela técnica da concentração constante
op	referente à temperatura operativa
outros	referente a outros compartimentos
PFT	referente à renovação horária obtida pela técnica PFT
p	referente a um ponto/local
poço	referente ao caudal/energia acumulado em cada zona
press	referente ao caudal obtido em pressão
quarto	referente ao caudal de ar novo no quarto obtido pela técnica da concentração constante
recolha	referente à incerteza relativa da recolha do gás traçador
ref	referente a local/altura de referência
s	referente à saída
sala	referente ao caudal de ar novo na sala obtido pela técnica da concentração constante
s-ar	referente à diferença entre a superfície e o ar ambiente
solo	referente à cota do solo
total	referente ao caudal total
total-45m^3/h	referente à diferença de pressão total para um caudal de 45 m^3/h
turb	referente à turbulência
v	referente ao vento

Símbolo	Designação
z	referente à cota referente à diferença entre duas zonas
∞	referente à pressão atmosférica referente ao valor-limite para a concentração do poluente referente à concentração de equilíbrio (final) do gás traçador
0	referente à concentração inicial do gás traçador
1, 2, 3, 4	referente a um local/zona/abertura
50	referente à renovação horária obtida através do ensaio de pressurização a 50 Pa

Índices superiores

Símbolo	Designação
n	referente a expoente de escoamento referente a índice superior de somatório correspondente ao número de fluxos
‾	referente à média temporal
α	referente a expoente que caracteriza a rugosidade do terreno

Siglas

Siglas	Designação
AICCOPN	Associação dos Industriais da Construção Civil e Obras Públicas do Norte
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
CFD	Mecânica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics*)
CLA	Camada Limite Atmosférica
COMIS	*Conjunction of Multizone Infiltration Specialists*
COVT	Concentração Total de Compostos Orgânicos Voláteis
ESTV	Escola Superior de Tecnologia de Viseu
FCT	Fundação para a Ciência e Tecnologia
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
HOPE	*Health Optimisation Protocol for Energy-Efficient Buildings*
IHRU	Instituto da Habitação e Reabilitação Urbana
INE	Instituto Nacional de Estatística

Siglas	Designação
INH	Instituto Nacional de Habitação
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
N, NE, E, SE, S, SW, W, NW, N	Octantes
OMS	Organização Mundial de Saúde
PER	Programa de habitações a custos controlados
PFT	Técnica de medição passiva do método do gás traçador (*Perfluorocarbon Tracer*)
PID	Proporcional-Integral-Diferencial
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
RGEU	Regulamento Geral das Edificações Urbanas
RSA	Regulamento de Segurança e Acções
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
SED	Síndroma dos Edifícios Doentes
TLV	Valor limite máximo admissível (*Threshould Limit Value*)
VLE	Valor Limite de Exposição

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A noção de desenvolvimento implica necessariamente a melhoria das condições de vida das populações, ou seja, conforto entendido em sentido lato, incluindo, por exemplo, o conforto higrotérmico e a qualidade do ar interior. Está hoje generalizada a ideia de que a energia e o ambiente são bens que têm de ser geridos e utilizados com os cuidados devidos ao que é finito. Estas preocupações estão consubstanciadas na versão de 2006 do RCCTE (Decreto - Lei n.° 80/2006, de 4 de Abril: Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios). Este especifica que, sem dispêndio excessivo de energia, sejam satisfeitas as exigências relativas ao conforto térmico, à qualidade do ar no interior dos edifícios e às necessidades de águas quentes sanitárias.

Fazia parte dos hábitos quotidianos dos portugueses a necessidade de abrir janelas para proceder à ventilação dos edifícios. Contudo, as preocupações com os consumos de energia, as alterações do modo de vida das pessoas (as famílias encontram-se ausentes da habitação durante grande parte do dia) e a utilização de caixilharias de melhor qualidade, com menor permeabilidade ao ar, conduziram à diminuição drástica das renovações horárias de ar, aumentando o risco de condensações, bem como reduziram a qualidade do ar interior.

As recomendações técnicas sobre ventilação de edifícios de habitação existentes em Portugal propõem taxas médias de uma renovação horária nos compartimentos principais (quartos e salas) e quatro renovações por hora nos compartimentos de serviço (cozinhas e instalações sanitárias).

Em face dos sistemas de ventilação usualmente empregues, admite-se que estas taxas não estejam a ser satisfeitas em grande parte dos edifícios de habitação construídos recentemente em Portugal. A adopção de sistemas de "ventilação geral e permanente" é fundamental.

1.2. OBJECTIVOS DO TRABALHO

Os sistemas de ventilação natural em Portugal não atingem todo o seu potencial, uma vez que o clima português não favorece o recurso ao efeito térmico, em face dos limitados diferenciais de temperatura, agravados pelo escasso aquecimento ambiente das habitações. A NP 1037-1: 2002 (Ventilação e Evacuação dos Produtos da Combustão dos Locais com Aparelhos a Gás. Parte 1: Edifícios de Habitação. Ventilação Natural), considera que o efeito térmico está essencialmente limitado à estação fria (entendida como a fase em que ocorrem diferenças de temperatura entre o interior das habitações e o exterior dos edifícios superiores a 8 ºC) e na estação quente os compartimentos principais devem ser arejados sobretudo por abertura das janelas.

Os sistemas de ventilação mecânica são predominantes nos países com clima frio. Em Portugal, em face dos inquéritos já realizados, conclui-se que estes sistemas encontram-se implementados predominantemente em edifícios multifamiliares e são raros os sistemas correctamente concebidos e implementados.

A investigação realizada em Portugal, tanto numa via experimental como numa via de modelação, tem demonstrado que os sistemas de ventilação natural correctamente dimensionados, têm algumas desvantagens, visto que, dificilmente atingem os caudais nominais durante todo o ano, acarretam um uso excessivo de grelhas de admissão de ar e provocam gastos energéticos de climatização superiores relativamente aos sistemas de ventilação mecânica alternativos.

O sistema de ventilação correntemente usado em Portugal recorre ao uso de uma extracção mecânica intermitente na cozinha, em simultâneo com extracção natural nas instalações sanitárias (sistema misto). O RCCTE considera que, em face do funcionamento do

extractor mecânico em períodos curtos de tempo, os edifícios que recorrem a este sistema são ventilados naturalmente.

Assim, é imprescindível compatibilizar todas as exigências no acto de projectar/construir edifícios de habitação e reequacionar os sistemas de “ventilação natural”, criando-se sistemas de ventilação "geral e permanente". No entanto, a melhor solução pode não passar por um “corte” com as práticas construtivas. Para isso, considera-se fundamental caracterizar o funcionamento de um sistema de ventilação misto (entradas de ar auto-reguláveis nos quartos e salas, extracção natural nas instalações sanitárias e exaustão mecânica na cozinha) que poderá contribuir para uma estratégia de ventilação de grande interesse.

A presente tese pretende avaliar qual a melhor constituição de um sistema misto de ventilação e definir regras construtivas a implementar, de modo a permitirem alcançar as renovações horárias preconizadas na normalização e regulamentação portuguesa.

De acordo com o atrás exposto, a presente investigação tem como objectivos principais:

- seleccionar e optimizar um sistema misto de ventilação adaptado às condições construtivas e climáticas de Portugal;
- caracterizar experimentalmente os dispositivos usados no sistema de ventilação ensaiado, nomeadamente, grelhas de admissão, passagem e extracção e o ventilador estático;
- caracterizar experimentalmente a permeabilidade ao ar das habitações ensaiadas, nomeadamente, renovação horária global (RPH_{50}), permeabilidade da caixa de estores, janelas e portas;
- realizar um estudo de sensibilidade envolvendo o funcionamento em simultâneo de um aparelho tipo B (esquentador) e a exaustão mecânica da cozinha. Este permitirá obter, entre outras, as condições limite de funcionamento do aparelho tipo B;
- realizar um estudo de sensibilidade nos dispositivos da instalação sanitária em condições de ventilação natural. Este permitirá obter quais os dispositivos mais influentes no desempenho global;

- aplicar o método do gás traçador, com especial ênfase a técnica PFT, ao estudo das renovações horárias do sistema de ventilação proposto;
- definir exigências de ventilação adaptadas às condições reais do clima interior dos edifícios portugueses e estabelecer regras claras a cumprir por um sistema de ventilação misto, de forma a satisfazer essas exigências.

Os objectivos principais são secundados por outros:

- realizar um inquérito a nível nacional de modo a fazer um levantamento sobre os tipos de sistemas de ventilação efectivamente implantados nas habitações;
- definir as exigências higrotérmicas, de qualidade do ar interior e de ventilação a que devem estar sujeitos os edifícios de habitação;
- fazer um levantamento sobre as técnicas de modelação de fluxos de ar aplicáveis a edifícios de habitação;
- devido ao seu potencial e carácter inovador em Portugal, apresentação aprofundada da técnica PFT e respectiva aplicação.

A investigação realizada em Portugal tem efectuado modelação de sistemas de ventilação natural, mecânica, mistos ou híbridos, expondo as potencialidades, vantagens e desvantagens de cada um. Por contraponto, a experimentação *in situ* tem sido bastante reduzida, à excepção da realizada pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Em face do exposto, entendeu-se não efectuar modelação do sistema proposto e desenvolver uma extensa campanha experimental.

1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO

O texto encontra-se dividido em seis partes, a saber:

- a primeira parte (capítulo 2) pretende elencar as exigências higrotérmicas, de qualidade do ar interior e de ventilação a que devem estar sujeitos os edifícios de habitação. Concretamente, apresentam-se os critérios de qualidade do ar, os principais poluentes do ar interior, as taxas de renovação de ar prescritas

internacionalmente e na normalização e regulamentação portuguesas, as condições de conforto global e local e os modelos adaptativos;

- a segunda parte (capítulo 3) apresenta os mecanismos condicionantes da ventilação natural, efeito de chaminé e vento, e os modelos preditivos existentes para dimensionar sistemas de ventilação, tais como: modelos empíricos (ventilação natural), multizona e zonal. Muito sucintamente, apresentam-se os modelos CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e as diversas possbilidades de acoplamento entre os modelos anteriores e os modelos de simulação térmica. Por fim, faz-se uma análise da aplicabilidade dos modelos às diferentes fases de concepção;
- a terceira parte (capítulo 4) apresenta os métodos do gás traçador e o de pressurização. Relativamente ao método do gás traçador, e devido ao seu maior uso na campanha experimental realizada, explicam-se com maior detalhe a técnica do declive e PFT (técnica de medição passiva). No que diz respeito ao método da pressurização, são apresentados os dados mais relevantes que se obtêm com este método. No sentido de avaliar da viabilidade das diversas técnicas do método do gás traçador para medir os respectivos caudais, apresentam-se os resultados de um conjunto de ensaios num apartamento do tipo T1 equipado com um sistema de ventilação com caudais descontínuos, sistema usual em Portugal;
- a quarta parte (capítulo 5), apresenta a normalização e regulamentação aplicável aos sistemas de ventilação em edifícios de habitação, os resultados dos estudos e inquéritos aos sistemas de ventilação implantados nos edifícios em Portugal e faz uma análise comparativa destes sistemas (ventilação natural, mecânica e mista);
- a quinta parte (capítulo 6), núcleo fundamental do trabalho, numa primeira fase, apresenta os cenários, a estratégia da campanha experimental e em face do carácter inovador em Portugal da utilização da técnica PFT, apresentam-se os resultados de dois ensaios exploratórios recorrendo a esta técnica obtidos num apartamento do tipo T2. Numa segunda fase, apresenta-se a caracterização dos elementos constituintes do sistema misto de ventilação ou de elementos construtivos. Numa terceira fase, apresenta-se toda a campanha experimental e respectivas conclusões;

- a sexta parte (capítulo 7) resume as principais conclusões, apresenta as principais recomendações para a concepção de um sistema misto de ventilação e perspectiva o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2. QUALIDADE DO AMBIENTE INTERIOR EM EDIFICIOS DE HABITAÇÃO

2.1. ENQUADRAMENTO

A qualidade do ambiente interior é uma preocupação que acompanha o Homem desde há séculos. As condições actuais de ocupação e a própria construção alteraram-se, nomeadamente:

- o aumento do tempo de permanência em edifícios (cerca de 90% das nossas vidas acontece no seu interior) e a maior densidade de ocupação e de equipamentos;
- a colocação de caixilharias de reduzida permeabilidade ao ar;
- a generalização do recurso a sistemas de ar-condicionado complexos;
- e a maior exigência do utilizador em relação ao conforto,

o que tem gerado um crescente interesse pela problemática da qualidade do ambiente interior em edifícios de habitação. Por outro lado, o aparecimento, nos últimos 20 anos, de inúmeros casos de "edifícios doentes"[1], levou à disseminação da preocupação relativa à qualidade do ambiente interior à população em geral [2.1].

O conceito de qualidade do ambiente interior é bastante complexo e abrangente, dependendo de um grande número de factores - temperatura, humidade relativa, velocidade do ar, existência de odores, concentração de microorganismos ou poeiras em suspensão no ar, nível de ruído, iluminação, etc. - que podem ser agrupados em quatro grandes áreas, a saber:

---

[1] Considera-se que um edifício sofre do Síndroma dos Edifícios Doentes (SED) quando um número significativo, mais de 20%, dos ocupantes sofre de sintomas (ex.: dores de cabeça, irritação das vias respiratórias, fadiga e irritação dos olhos) sem que exista uma doença clinicamente diagnosticada que o justifique; estes sintomas desaparecem quando se deixa o edifício.

- qualidade do ar;
- qualidade higrotérmica;
- qualidade acústica;
- qualidade da iluminação.

No presente capítulo só serão abordadas as duas primeiras áreas, por serem as mais relevantes para a presente tese.

2.2. QUALIDADE DO AR INTERIOR

2.2.1. CRITÉRIOS DE QUALIDADE DO AR

É desejável que o ar seja percepcionado como fresco e agradável, isto é, não tenha impacto negativo na saúde e que estimule o trabalho [2.2].

O ambiente interior dos edifícios é contaminado por substâncias que resultam da utilização corrente desses espaços ou que são emanadas pelos materiais que os integram (admitindo que o ar exterior não é fonte de poluição) [2.3]. Essas substâncias, dependendo das suas características e da sua concentração, podem ter efeitos sobre o bem-estar dos ocupantes, que vão desde a sensação ligeira de mal-estar até, no limite, originar doenças graves ou mesmo a morte, como no caso do monóxido de carbono (CO). De entre as actividades que constituem fontes de poluentes, são de salientar [2.3]:

- a actividade fisiológica humana;
- o uso de tabaco;
- a combustão nos aparelhos a gás;
- a preparação de alimentos;
- a lavagem e secagem de loiça e roupa;
- a utilização das instalações sanitárias.

De uma forma geral e desde que a qualidade do ar exterior seja aceitável, pode-se obter uma boa qualidade do ambiente interior recorrendo a uma adequada ventilação desses espaços. O dimensionamento e a implementação de sistemas de ventilação em edifícios de habitação deverão ter necessariamente em conta as fontes de poluição de forma a proceder à evacuação para o exterior das substâncias poluentes, preferencialmente, junto da sua fonte, evitando assim a contaminação do ar interior. Por exemplo, no caso dos aparelhos de combustão de utilização doméstica dos tipos B e C (esquentadores, caldeiras, etc.) os produtos da combustão deverão ser evacuados directamente para o exterior. No caso dos aparelhos do tipo A (ex.: fogões de cozinha) deverão, preferencialmente, ser evacuados nas suas proximidades [2.4].

A estratégia de ventilação, se for deficientemente concebida ou implementada, pode ser causadora de desconforto, devido, por exemplo, às correntes de ar. Por outro lado, a sua correcta concepção e implementação pode contribuir para a remoção da carga térmica no interior dos edifícios, participando na melhoria das condições de conforto térmico.

A qualidade do ar interior deve ser assegurada com a finalidade de evitar que poluentes perigosos atinjam concentrações que possam pôr em risco a saúde dos ocupantes, mantendo, simultaneamente, um ambiente agradável [2.3]. Assim, devem coexistir dois critérios: estabelecimento de valores limite para as substâncias poluentes em função do tempo de permanência dos ocupantes no ambiente contaminado (critério de saúde)[2] e estabelecimento de critérios relacionados com os efeitos sensoriais causados pelas substâncias poluentes nos seres humanos (critério sensorial) [2.7], [2.8].

É importante a coexistência dos dois critérios, uma vez que há substâncias que só podem ser avaliadas por um deles. Por exemplo, o monóxido de carbono é um gás que, em concentrações relativamente elevadas, é mortal, e, sendo incolor e inodoro, não é detectável pelo ser humano. Por outro lado, os odores podem ter diversas origens que os tornam difíceis de quantificar, contudo, geram incomodidade pelo facto dos seres humanos lhes serem sensíveis. Relativamente ao primeiro caso (monóxido de carbono) adequa-se o

[2] Existe documentação onde se acede a valores limite de exposição - entende-se como exposição o produto da concentração pelo tempo [2.5], [2.6].

critério da imposição de valores limite, enquanto no segundo caso aplicam-se os critérios relacionados com os efeitos sensoriais [2.3].

Apresentam-se no Quadro 2.1 as concentrações máximas de referência de poluentes no interior dos edifícios segundo o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização (RSECE: DL 79/06, de 4 de Abril) [2.9].

Em princípio, ambos os critérios devem ser sempre verificados, a menos que as fontes de poluição claramente privilegiem uma das situações, bastando para isso a verificação de um critério para que o outro seja sempre verificado [2.3]. Por exemplo, em situações que envolvam combustão, como nos parques de estacionamento cobertos, os ocupantes estão predispostos a sentirem temporariamente os inconvenientes dos odores desagradáveis dos produtos da combustão e são incapazes de sentir se o ambiente é perigoso. Neste caso, a determinação da concentração do monóxido de carbono pode constituir um indicador adequado. Por outro lado, num local fechado, onde os ocupantes constituam a maior fonte de poluição do ar, a situação mais crítica é constituída pela sensação de "ar viciado" que tem quem entra, sem que os poluentes atinjam quaisquer concentrações que ponham em risco a saúde dos ocupantes. Neste caso bastará uma apreciação dos efeitos sensoriais dos poluentes[3].

[3] Em documentação especializada pode obter-se o rácio entre o limite de exposição para critérios de saúde - *TLVs* - (*Threshould Limit Value*; equivalente a *VLE*: Valor Limite de Exposição [2.6]) e os limites de exposição para odores (obtidos para 50% de insatisfeitos), obtendo-se, nomeadamente, para o benzeno, um rácio de 0,01, demonstrando, neste caso, que o critério do odor é claramente mais restritivo [2.10].

Quadro 2.1 - Concentrações máximas de referência de poluentes no interior dos edifícios [2.9].

Parâmetros	Concentração máxima de referência
Partículas suspensas no ar (PM_{10})	0,15 mg/m^3
Dióxido de carbono	1800 mg/m$^{3(c)}$
Monóxido de carbono	12,5 mg/m^3
Ozono	0,2 mg/m^3
Formaldeído	0,1 mg/m^3
Compostos orgânicos voláteis totais (*COVT*)	0,6 mg/m^3
Microorganismos (bactérias ou fungos)	500 UFC/m$^{3(d)}$
Legionella$^{(a)}$	100 UFC/l$^{(d)}$
Radão$^{(b)}$	400 Bq/m^3

Notas:
- a: pesquisa obrigatória em edifícios com sistemas AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) com produção de aerossóis;
- b: pesquisa obrigatória em zonas graníticas, nomeadamente, nos distritos de Braga, Vila Real, Porto, Guarda, Viseu e Castelo Branco;
- c: presumivelmente, o valor limite do CO_2 prende-se com critérios sensoriais;
- d: UFC = unidades formadoras de colónias; esta unidade não está explicitamente apresentada no texto original.

2.2.2. EFEITOS SENSORIAIS DOS POLUENTES

Os efeitos sensoriais dos poluentes, sendo subjectivos, são mais difíceis de determinar. O ser humano tem a percepção da qualidade do ar por duas vias: o olfacto, situado na cavidade nasal, e a sensibilidade aos produtos irritantes (sensibilidade química), que se situa nas mucosas do nariz e dos olhos. É através da combinação dos estímulos sentidos por estas duas vias que os seres humanos se apercebem que o ar é "fresco" e agradável ou "pesado" e irritante [2.11]. Realçe-se que o Homem é capaz de se adaptar a situações de odor desagradável, mas não tem essa mesma capacidade para situações de irritabilidade. Desta forma, a percepção sensorial da qualidade do ar pode ser expressa em função da proporção do número de pessoas que consideram que a qualidade do ar dum espaço no qual acabaram de entrar é inaceitável (percentagem de insatisfeitos). No caso dos bioefluentes humanos, a poluição gerada por uma pessoa padrão é designada por 1 olf. A pessoa padrão corresponde, em média, a um trabalhador de escritório adulto, sedentário e em situação de conforto térmico.

A percepção da qualidade do ar num espaço sujeito a uma fonte de poluição de 1 olf e com uma taxa de ventilação de 10 l/s (36 m^3/h) corresponde a 1 decipol (1 decipol = 1 olf / (10 l/s) = 0,1 olf/(l/s)).

Note-se que esta percepção se baseia sempre na sensação que um indivíduo estranho ao espaço considerado tem quando nele entra, uma vez que, após um período de habituação, o novo ocupante deixa de se sentir tão desconfortável.

Em rigor, a metodologia de avaliação dos efeitos sensoriais dos poluentes obriga a um processo experimental no qual são questionados os ocupantes de um dado espaço. Tal processo é moroso e difícil de executar, pelo que é corrente ser utilizado um indicador relacionado com a fonte de poluição mais importante para o espaço considerado. No caso da fonte mais importante ser constituída pela ocupação humana é corrente ser utilizado o dióxido de carbono (CO_2) como indicador. Este constitui o bioefluente humano mais importante e é proporcional ao metabolismo. No Quadro 2.2 é indicada a relação entre os níveis de qualidade do ar e a concentração de dióxido de carbono acima da concentração exterior adoptada em normalização europeia.

No sentido de se obter uma qualidade do ar aceitável, as condições de ventilação para reduzir o risco para a saúde resultante da respiração do ar de um determinado contaminante devem ser tratadas separadamente das condições de ventilação para obter uma percepção da qualidade do ar satisfatória. A observância de um dos critérios poderá não corresponder necessariamente à observância do outro. Efectivamente, as concentrações dos diversos poluentes podem ser substancialmente inferiores aos valores limite para constituírem perigo para a saúde e, mesmo assim, os ocupantes manifestarem insatisfação com a qualidade do ar interior [2.12]. É recomendável que seja adoptada a taxa de ventilação resultante do maior valor de entre os dois critérios anteriores. Na prática, o critério sensorial é determinante [2.11].

Quadro 2.2 - Relação entre os níveis de qualidade do ar e a concentração de CO_2 acima da concentração exterior (adaptado de [2.7] e [2.11]).

Categoria	Percepção da qualidade do ar		Concentração de CO_2[(a)] [ppm]
	Insatisfeitos	Decipol	
A	15%	1,0	460
B	20%	1,4	660
C	30%	2,5	1190

Nota:
- a: no Quadro 2.1 apresenta-se uma concentração máxima de referência de 1800 mg/m^3, o que corresponde, aproximadamente, a 1000 ppm. Excluindo a concentração exterior de CO_2, a concentração referida é equivalente à classe B aqui apresentada.

2.2.3. QUALIDADE DO AR EM EDIFÍCIOS HABITACIONAIS

Em edifícios de habitação, os sistemas de ventilação destinam-se, no essencial, a assegurar a qualidade do ar interior, fornecer ar novo para os aparelhos de combustão e assegurar a extracção dos produtos da combustão. Esta ventilação deve ser assegurada em condições de conforto e segurança, minimizando os consumos de energia [2.13].

A admissão de ar exterior é requerida para salvaguardar a saúde dos ocupantes e tem as seguintes funções [2.14]:

- diluição e remoção de poluentes, nomeadamente, substâncias emitidas pelo mobiliário, materiais de construção, produtos de limpeza, odores, CO_2 proveniente do metabolismo humano e vapor de água. A estes poluentes correspondem, normalmente, taxas de emissão baixas mas contínuas e difusas;
- diluição e remoção de poluentes específicos de fontes identificadas, como, por exemplo, odores provenientes de instalações sanitárias, cocção de alimentos, vapor de água da cocção de alimentos ou banhos, fumo do tabaco e produtos da combustão. A estes poluentes correspondem, normalmente, taxas de emissão relativamente altas mas de curta duração e localização específicas;
- provisão de oxigénio para a respiração dos ocupantes;
- controlo da humidade interior proveniente das práticas de higiene pessoal (banhos), da lavagem e secagem de loiça e roupa, etc.;
- provisão de ar para os aparelhos de combustão.

A utilização dos critérios sensoriais em edifícios de habitação ainda não está fundamentada, no entanto, em estudo recente [2.13], adoptaram-se os seguintes limites para os critérios de qualidade do ar interior nos compartimentos principais - quartos e salas - com o objectivo de determinar as taxas de ventilação (exemplo semelhante encontra-se em [2.14]):

- concentração de CO_2 menor do que 3500 ppm (critério de saúde);
- concentração de CO_2 com origem no metabolismo humano menor do que 1000 ppm (critério sensorial);
- humidade relativa do ar interior menor do que 80% para uma temperatura interior de 18ºC, admitindo que a temperatura do ar exterior é de 10ºC e a humidade relativa de 95%;
- percepção da qualidade do ar interior de 1,4 decipol (corresponde a 20% de insatisfeitos).

Nos compartimentos de serviço - cozinhas e instalações sanitárias - o mesmo estudo refere os seguintes critérios:

- nas instalações sanitárias: redução da concentração de odores e vapor de água a 40% do seu valor inicial ao fim de 15 minutos;
- nas cozinhas (sem aparelhos do tipo B [2.4]): para o caudal de base[4] considera-se a redução da concentração de poluentes a 40% do seu valor inicial ao fim de 30 minutos (correspondente a 2 renovações por hora); para o caudal máximo[5], considera-se o caudal maior entre os caudais de 180 m^3/h e 216 m^3/h, este multiplicado pela largura do fogão.

Dado que, habitualmente, o vapor de água é um dos poluentes mais significativo, sobretudo nos compartimentos principais, conforme se pode constatar no estabelecimento dos critérios anteriores, pode-se adoptar um critério menos restritivo de modo a que a humidade relativa seja superior a 70% em apenas 2 horas, em períodos de 12 horas, e superior a 90% em apenas 1 hora, em períodos de 12 horas [2.13], [2.15].

[4] Fora do período de confecção das refeições.
[5] Durante o período de confecção das refeições.

2.2.4. FONTES DE POLUIÇÃO DO AR INTERIOR

2.2.4.1. Principais poluentes no interior das habitações

A densidade de ocupação e de equipamentos e os materiais sintéticos de revestimento (tintas, vernizes, aglomerantes) estão na origem da elevada taxa de geração de poluentes no interior dos edifícios modernos. Por esta razão, a qualidade do ar interior é, na generalidade dos casos, significativamente inferior à qualidade do ar exterior e, naturalmente, também inferior ao desejável. Assim sendo, e atendendo a que 90% das nossas vidas acontece no interior de edifícios, é fundamental acautelar a qualidade do ar interior, nomeadamente ao nível do projecto, da instalação e da própria exploração do edifício. Uma má qualidade do ar interior pode originar efeitos imediatos (odores desagradáveis), efeitos a curto prazo (irritações e infecções ao nível das vias respiratórias, da pele, dos olhos) e até efeitos a médio / longo prazo, como é o caso extremamente grave do tumor dos pulmões, causado pela inalação de amianto em suspensão no ar [2.1].

Apresenta-se no Quadro 2.3 o grau de importância de alguns poluentes nos diferentes compartimentos de uma habitação.

Quadro 2.3 - Grau de importância de alguns poluentes nos compartimentos de uma habitação (adaptado de [2.16]).

	Poluentes									
Compartimentos	Fumo de tabaco	Odor corporal (dióxido de carbono)	Vapor de água	Produtos da combustão	Formaldeído	Orgânicos	Partículas [a]	Microorga-nismos	Radão	Outros
Salas	++	++	o	++	o	p	p	o	o	
Quartos	++	++	oo	oo	o	p	p	o	o	
Cozinhas	+		oo	++	o	p	p	oo	o	
Inst. sanitárias			oo	oo				oo		Odor
Inst. sanitárias sem banho								p		Odor

Notas:
- Nível de importância: ++ Muito importante; + Importante; o Importante em situações específicas; oo Muito importante em situações específicas; p possivelmente importante, mas até ao momento conhecimento limitado;
- a: Muito importante no caso de sensibilidade contra reacções alérgicas.

Embora a regulamentação portuguesa mais relevante na área da qualidade do ar interior (RSECE [2.9], ver Quadro 2.1) seja aplicável a edifícios climatizados (com sistemas AVAC), recomenda-se o controlo dos mesmos poluentes e da humidade relativa em todos os edifícios de habitação. De seguida, analisam-se os poluentes descritos na referida legislação, bem como o vapor de água (ou a humidade relativa), factor preponderante na determinação dos caudais de ventilação.

2.2.4.2. Actividade humana

Quer as actividades que decorrem no interior dos edifícios, quer os próprios materiais integrados na construção podem produzir ou libertar substâncias indesejáveis no ambiente interior. No Quadro 2.4 é indicada a produção de vapor de água e a libertação de dióxido de carbono provocada pelos ocupantes para diferentes níveis de actividade.

Quadro 2.4 - Poluição provocada pelos ocupantes humanos (adaptado de [2.3] e [2.17]).

Actividade	Vapor de água [g/h]	Dióxido de carbono [l/h]
Repouso	40	14,4
Trabalho leve	50	23,0 a 46,1
Trabalho moderado	50	46,1 a 69,1
Trabalho pesado	50	69,1 a 93,6
Trabalho muito pesado	50	93,6 a 115,2
Nota: - informação adicional pode ser encontrada em [2.14] e [2.18].		

Humidade / vapor de água

A humidade relativa do ar interior pode influenciar, directa ou indirectamente, a actividade dos ocupantes. Baixos valores de humidade relativa podem provocar sensações de secura, irritação na pele e nas membranas mucosas de alguns ocupantes, infecções das vias respiratórias ou desconforto no contacto com alguns materiais devido à geração de electricidade estática. Valores altos de humidade relativa podem também originar desconforto (inibem a transpiração através da pele) e o desenvolvimento de bolores e ácaros causadores de alergias, irritações e, em casos mais graves, asma. Valores de humidade relativa entre 30 a 70% são considerados adequados [2.11], [2.14], [2.19].

Nas normas EN 15 251: 2007 [2.7] e ASHRAE 55: 2004 [2.20] apenas se limita o valor superior do teor de humidade em 12 g/kg. O Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE: DL 80/06, de 4 de Abril) [2.21] estabelece uma humidade relativa interior de referência de 50% para a estação de arrefecimento.

As diversas actividades domésticas geram também quantidades apreciáveis de vapor de água. No Quadro 2.5 são apresentados valores indicativos da massa de vapor de água libertada por essas actividades.

Quadro 2.5 - Massa de vapor de vapor de água libertada em actividades domésticas (adaptado de [2.3] e [2.17]).

Actividade	Vapor de água [g/dia]
Cozinhar a electricidade	2000
Cozinhar a gás	3000
Lavagem de loiça manual	400
Banho (por pessoa)	200
Lavagem de roupa manual	500
Secagem de roupa no interior de um compartimento (por pessoa)	1500

A taxa de ventilação necessária para atingir um certo nível de humidade interior pode ser calculada a partir da equação do balanço de humidade num compartimento. Assim, tem-se [2.22]:

$$q = 2{,}83 \cdot 10^{-3} T_e \omega / (U_e - U_i) \qquad (2.1)$$

em que:

- q: caudal volúmico de ar exterior [m^3/s];
- T_e: temperatura do ar exterior [K];
- ω: produção de vapor no interior de um local [kg/s];
- U_e: teor de humidade do ar exterior [kg/kg];
- U_i: teor de humidade do ar interior [kg/kg].

As hipóteses que estão na base da equação anterior são:

- mistura homogénea entre ar exterior e ar interior;
- pressão atmosférica igual a 101 315 Pa e constante universal dos gases relativa ao ar seco igual a 287 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$;
- compartimentos sem trocas de humidade com compartimentos vizinhos;
- difusão de humidade nos materiais de revestimento do compartimento, desprezável comparativamente à transferência de humidade devida à ventilação.

Dióxido de carbono

A combustão dos aparelhos do tipo A e B [2.4] e o fumo do tabaco produzem vapor de água e dióxido de carbono (CO_2). No Quadro 2.6 são indicados os caudais produzidos por dois dos combustíveis mais usados.

Quadro 2.6 - Produção de vapor de água e de dióxido de carbono resultante da combustão (adaptado de [2.3] e [2.17]).

Combustível	Vapor de água [g/h por kW]	Dióxido de carbono [l/h por kW]
Gás natural	150	97
GPL	130	119

O processo metabólico dos ocupantes de um espaço requer oxigénio (0,1 a 0,9 $l \cdot s^{-1} \cdot pessoa^{-1}$, dependendo do metabolismo [2.22]) e produz gases como CO_2, H_2O, aldeídos, ésteres e álcoois [2.19]. O CO_2 é um gás incolor e inodoro e em termos de quantidade é o mais importante bioefluente com uma taxa de emissão proporcional ao metabolismo, podendo ser estimada a sua produção pela equação [2.22][6]:

$$G = 4 \cdot 10^{-5} MA \qquad (2.2)$$

[6] Formulação alternativa encontra-se em [2.18].

em que:

- *G*: emissão de CO_2 [l/s];
- *M*: produção de calor metabólico [W/m^2];
- *A*: superfície do corpo [m^2].

A baixas concentrações, tipicamente ocorridas no interior de edifícios, o CO_2 é inofensivo. No entanto, se presente em concentrações elevadas, pode originar afectações da respiração, dores de cabeça, etc. [2.1]. No que respeita a valores limite, dado que o CO_2 não é considerado um gás tóxico, a Organização Mundial de Saúde (OMS) não define um valor limite para a concentração deste gás no interior de edifícios não industriais. No entanto, a *Health Canada* recomenda para edifícios de habitação um nível máximo de referência de 3500 ppm para uma exposição prolongada [2.8]. A taxa de ventilação requerida para manter este nível de concentração é bastante baixa, o que quer dizer que, raramente, por si só, o CO_2 coloca problemas de saúde.

O CO_2 raramente atinge níveis excessivos no ambiente interior, todavia, pode ser usado como uma medida da percepção da qualidade do ar, quando a principal fonte de poluição são os bioefluentes humanos. No entanto, apesar de ser um bom indicador da poluição provocada por seres humanos sedentários, é frequentemente um indicador geral pobre da percepção da qualidade do ar, nomeadamente de fontes não poluidoras de CO_2 [2.11].

Monóxido de carbono

O monóxido de carbono (CO) é um gás inodoro, insípido e incolor, resultante da combustão, em especial quando esta ocorre em situação redutora (ambiente pouco rico em oxigénio). Como exemplos de fontes de CO temos os fogões, o tabaco e os automóveis. Informação sobre a produção de CO_2, CO e NO_x por parte do tabaco, fornos e fogões domésticos encontra-se em [2.18]. Em concentrações extremamente baixas, o CO provoca dores de cabeça e sonolência e à medida que a concentração vai aumentando os sintomas passam a incluir problemas de concentração, visão e náuseas e, em casos limites, pode levar à morte, uma vez que a hemoglobina do sangue reduz o oxigénio para níveis insuficientes, pelo facto de ter maior afinidade com o monóxido de carbono.

Foi desenvolvido um estudo em Portugal, por uma equipa hospitalar, entre Novembro de 1992 e Novembro de 2004, onde se observaram 148 crianças com sintomas de intoxicação devidas ao CO. A grande maioria dos casos ocorreu nas estações mais frias (Outono e Inverno) em habitações que dispunham de um esquentador ou caldeira [2.23].

2.2.4.3. Materiais de construção

Diversas substâncias poluentes podem ser libertadas no interior dos edifícios pelos materiais de construção. As substâncias que têm merecido mais atenção são os Compostos Orgânicos Voláteis (COVs) e particularmente o formaldeído (HCHO), por existirem no ambiente interior, em concentrações superiores às do exterior. Este último composto, embora sendo um COV, normalmente é referido separadamente, pois o seu método de recolha e análise difere dos COVs.

Compostos Orgânicos Voláteis

Os COVs são compostos que à temperatura ambiente se encontram na fase gasosa (ponto de ebulição entre 50 e 260ºC) [2.24]. As principais fontes de COVs são os materiais utilizados no revestimento interior dos edifícios, respectivos componentes e mobiliário, tais como, aglomerados de madeira, colas, solventes e tintas. Para além destes, são também fontes de COVs os produtos de limpeza e o tabaco. São exemplos de COVs comuns em ambientes interiores a acetona, o benzeno, o fenol e o tolueno. Os efeitos indesejáveis resultantes da exposição a concentrações excessivas destes compostos dependem do composto em questão. De uma forma geral, podem-se apontar como sintomas mais comuns: dores de cabeça, sensação de fadiga e outros sintomas de depressão do sistema nervoso central, arritmias cardíacas, afectações do fígado, irritação ao nível do sistema respiratório e irritação oftalmológica [2.1]. Refira-se que alguns COVs são reconhecidos como carcinogéneos (ex.: benzeno e o cloreto de vinilo) [2.24].

Os COVs detectáveis num edifício podem consistir em centenas de diferentes compostos, o que torna a análise e avaliação dos riscos (incluindo efeitos combinados) e o estabelecimento de limites de exposição uma tarefa bastante complicada. Dadas as baixas concentrações normalmente existentes no interior de edifícios, a avaliação sensorial tem

sido apresentada como constituindo uma componente muito importante na caracterização da qualidade do ar interior [2.24].

Em face da dificuldade em conhecer com precisão os efeitos sobre os seres humanos da exposição a uma grande variedade de COVs, cujos efeitos se combinam de forma complexa, definiu-se o parâmetro *COVT* (Concentração Total de Compostos Orgânicos Voláteis).

No entanto, o uso do parâmetro *COVT* tem vindo a ser posto em questão, dado que ainda não se conseguiu encontrar uma correlação entre os valores de *COVT* e efeitos na saúde ou no desconforto experimentado pelos ocupantes em edifícios com problemas. Por estes motivos, o *COVT* não pode ser utilizado como um indicador da qualidade do ar por si só. Acresce o facto de que o conceito de *COVT* tem limitações como indicador da qualidade do ar interior, uma vez que não tem em conta a respectiva toxicidade isolada de cada composto [2.24]. Contudo, o parâmetro *COVT* pode ser usado, nomeadamente, para aquilatar da insuficiência dos caudais de ventilação, avaliar a eficiência de um sistema de ventilação ou identificar as actividades mais poluidoras [2.25].

Investigação recente em Portugal [2.26] recomenda um *COVT* inferior a 300 $\mu g/m^3$ (valor inferior ao indicado no Quadro 2.1). Também em Portugal, medições em quatro salas de apartamentos revelaram que *COVT* era inferior àquele valor e entre os COVs distinguia-se o grupo denominado por hidrocarbonetos aromáticos (ex.: benzeno e tolueno) [2.27].

Formaldeído

O formaldeído (HCHO) é um gás incolor com um odor forte, pelo que é facilmente detectado pelo homem. No interior dos edifícios são as resinas utilizadas nos aglomerados de madeira e a combustão (cigarros, aparelhos de aquecimento e confecção de alimentos) as principais fontes. A sua concentração média no ambiente interior em edifícios correntes varia, em regra, entre 0,03 mg/m^3 (0,02 ppm) e 0,06 mg/m^3 (0,05 ppm). A exposição individual diária pela respiração varia entre 0,3 e 0,6 mg. No caso de um fumador a exposição diária é maior, podendo chegar a 2 mg, fumando 20 cigarros por dia [2.5].

Os sintomas associados à exposição ao formaldeído incluem irritação oftalmológica, dores de cabeça, náuseas, sensação de fadiga, etc. [2.1]. É o poluente que ocorre com maior frequência nas atmosferas interiores em concentrações capazes de provocar irritação sensorial nos olhos e no aparelho respiratório [2.24]. A concentração limite de detecção olfactiva é de 0,06 mg/m^3 (0,05 ppm) e o limiar inferior de concentração de formaldeído que origina uma irritação sensorial de aproximadamente 0,1 ppm.

2.2.4.4. Outras fontes

Neste ponto tem cabimento analisar os poluentes que têm uma fonte maioritariamente externa ao edifício, como é o caso do radão, bem como os poluentes que têm diversas fontes, como são os casos das partículas, ozono e microorganismos.

Radão

O radão (Rn) é um gás inodoro, insípido e incolor, que existindo naturalmente no solo, é facilmente introduzido nos edifícios, quer por efeito de difusão, quer por depressão dos ambientes interiores provocada por sistemas de ventilação ou por efeito de chaminé.

Sendo radioactivo, o radão quando inalado é uma substância carcinogénea responsável pelo incremento da incidência de casos de cancro nos pulmões em populações expostas.

Os valores médios medidos em Portugal, no interior de edifícios públicos e habitações rurais ou urbanas, situam-se abaixo dos 50 Bq/m^3. No entanto, há regiões onde as concentrações atingem 400 Bq/m^3, principalmente em zonas graníticas [2.28].

Partículas

As partículas dos ambientes interiores podem ter diâmetros compreendidos entre 0,001 e 100 μm. Podem ser de diversa tipologia e transportar organismos vivos como vírus (0,003 a 0,06 μm), fungos (2 a 10 μm) e bactérias (0,4 a 5 μm). As partículas cuja dimensão sejam menores que 10 μm (PM_{10}) designam-se por torácicas e são normalmente retidas no nariz e traqueia, mas podem entrar nos pulmões e penetrar em qualquer parte deste órgão, dependendo da sua dimensão. Designam-se por partículas respiráveis ou finas ($PM_{2,5}$) as

partículas que, devido à sua muito pequena dimensão, podem penetrar profundamente no nosso sistema respiratório. Estas partículas podem ter proveniência do fumo do tabaco (0,01 a 1 μm), dos produtos da combustão ou do ar exterior. Refira-se que no ar, 99% do número de partículas tem diâmetro inferior a l μm [2.10].

Em média, em ambientes sem fumo do tabaco, metade da exposição a partículas finas provém de partículas com origem no ambiente exterior, mas que se encontram no ambiente interior. Em ambientes com fumo do tabaco, 50% da exposição a partículas finas provém deste. Normalmente, a exposição a PM_{10} é maior do que os níveis destas partículas no exterior, excepto em casos pontuais de elevada poluição exterior [2.29].

A composição química e a forma geométrica destas partículas é muito variável pelo que os seus efeitos sobre o organismo humano são muito diversos. No entanto, quanto mais pequenas as partículas, mais os efeitos são adversos para a saúde (partículas inferiores a 2 μm têm efeitos mais adversos [2.10]). De uma forma geral, podem-se associar com problemas respiratórios, bronco-constrição, agravamento de sintomas em doentes com asma, redução das funções pulmonares, etc.. Uma exposição prolongada a este tipo de partículas pode resultar em bronquite crónica [2.1].

Ozono

A formação do ozono (O_3) troposférico resulta das reacções, na presença da luz solar, entre os óxidos de azoto (NO_x) e os COVs. No interior de edifícios, o ozono é libertado, nomeadamente, por fotocopiadoras e impressoras a laser.

Os sintomas da exposição ao ozono relacionam-se, nomeadamente, com alteração das funções pulmonares e inflamações nas vias respiratórias bem como o exacerbar de problemas de asma.

Microorganismos

As quatro maiores categorias de microorganismos que ocorrem em ambientes interiores de habitações são: bactérias[7], ácaros[8], microorganismos provenientes de animais de estimação

[7] Microorganismo vegetal desprovido de clorofila e núcleo celular que na maioria dos casos se alimenta de matéria orgânica.

e fungos[9]. Estes microorganismos podem provocar manifestações de alergia do tipo rinites (inflamação da mucosa do nariz) e asma [2.30].

Os fungos e bactérias implicados em manifestações de alergia geralmente vivem alimentando-se de matéria orgânica (escamas de pele humana ou animal, papel e madeira) em ambientes húmidos.

A maioria dos fungos desenvolve-se a temperaturas entre 10 e 35ºC, sendo o teor de água dos materiais onde se depositam de capital importância. A maior parte dos fungos responsáveis por problemas no interior dos edifícios pertence a um grupo normalmente designado por bolor (fungo com estrutura de filamentos e reprodução através de esporos [2.10]). A água que favorece o seu desenvolvimento, normalmente, provém da condensação superficial ou intersticial. A presença de fungos varia consoante a estação do ano e, normalmente, o maior número ocorre nas estações do Outono e Verão. Durante estas estações, o ar exterior é a maior fonte de fungos no ambiente interior [2.30].

As bactérias são muito mais simples que os fungos, geralmente requerem mais água para crescer, e frequentemente crescem em líquidos ou periodicamente em superfícies húmidas. O crescimento de populações de bactérias até concentrações excessivas é geralmente associado a medidas inadequadas de manutenção de locais onde a água é retida (ex.: sistemas fechados de água quente ou fria e reservatórios de água) ou fugas de água criando água estagnada [2.10]. Um dos exemplos mais estudado é a *Legionella*, fonte de infecções e causadora de pneumonia.

De acordo com os conhecimentos actuais, não é possível indicar valores limites [2.30]. A maioria das autoridades de saúde, em vez de prescrever níveis máximos de concentração no interior dos edifícios, recomenda a comparação, para cada microorganismo, entre as concentrações do interior e exterior. Se este rácio é significativamente maior do que a unidade, assume-se que o organismo é reproduzido no interior e, portanto, deve-se encontrar a fonte e eliminá-la [2.31]. No Quadro 2.7 apresenta-se uma classificação da

[8] Animal do grupo dos acarídeos, que inclui os causadores da sarna do homem e as carraças dos cães.
[9] Organismo celular vegetal que se reproduz por esporos e que normalmente se alimenta de matéria orgânica morta e se encontra preferencialmente em lugares húmidos e pouco iluminados.

população de fungos e bactérias baseada na gama de valores encontrada em ambientes interiores de habitações relativamente ao exterior (e não na avaliação de risco na saúde).

Quadro 2.7 - Níveis das populações, em relação ao exterior, de fungos e bactérias em habitações (adaptado de [2.30]).

Nível	Fungos [UFC/m^3]	Bactérias [UFC/m^3]
Muito baixo	< 50	< 100
Baixo[(a)]	< 200 - 500[(b)]	< 500
Intermédio	< 1 000	< 2 500
Alto	< 10 000	< 10 000
Muito alto	> 10 000	> 10 000

Notas:
- a: coincide com valores de referência do Quadro 2.1, embora neste não se indique se o respectivo valor é para ser tomado relativamente ao exterior;
- b: os limites variam em função do método de análise.

Pode recomendar-se, como critério adicional, que sempre que um determinado fungo tenha concentrações até 50 UFC/m^3 deverá realizar-se uma investigação ao ambiente [2.32].

Os poluentes apresentados anteriormente representam somente uma pequena parcela daqueles que se podem encontrar em ambientes interiores (informação adicional poderá ser encontrada em [2.33] e [2.34]). No Quadro 2.8 sintetiza-se a informação referente às fontes dos diversos poluentes, bem como o rácio concentração interior *versus* concentração exterior.

Quadro 2.8 - Lista das principais substâncias poluentes no interior, fontes e rácio concentração interior *versus* concentração exterior (adaptado de [2.10]).

Poluente	Fonte de poluição interior	Rácio concentração interior *versus* concentração exterior
Dióxido de carbono (CO_2)	Processo de combustão e humanos	>> 1
Monóxido de carbono (CO)	Combustão incompleta e fumo do tabaco	>> 1
Vapores orgânicos	Produtos da combustão, solventes e produtos de limpeza	> 1
Formaldeído (HCHO)	Isolantes térmicos, colas, derivados da madeira e fumo do tabaco	>> 1

Quadro 2.8 - Lista das principais substâncias poluentes no interior, fontes e rácio concentração interior versus concentração exterior (adaptado de [2.10]) (continuação).

Poluente	Fonte de poluição interior	Rácio concentração interior *versus* concentração exterior
Radão (Rn)	Terreno ou rochas por baixo do edifício e materiais de construção	>> 1
Ozono (O_3)	Fotocopiadoras e impressoras laser	> 1
Organismos viáveis[(a)]	Humanos, animais de estimação, insectos, plantas, fungos e ar condicionado	> 1

Nota:
- a: os microorganismos têm que se manter viáveis para provocar infecções, no entanto, microorganismos não viáveis podem provocar reacções alérgicas.

Em estudo recente a nível europeu, realizado em 9 países, envolvendo 164 edifícios, 66 de apartamentos e 98 de escritórios (75% dos quais energeticamente eficientes), teve-se por objectivo avaliar o desempenho integrado dos edifícios, tanto a nível energético, como ao nível da saúde dos ocupantes e conforto. O desempenho foi avaliado recorrendo, sequencialmente, à inspecção ao edifício (recolha de dados do edifício e envolvente), questionários aos trabalhadores/moradores e medições (ex.: teores de CO e *COVT*). Obtiveram a classificação de “Green” (bom desempenho) 24 edifícios de apartamentos, em contraste com somente oito de escritórios, e a classificação de “Red” (mau desempenho) 34 edifícios de apartamentos e 15 de escritórios. No Quadro 2.9 apresentam-se alguns dos resultados obtidos para os edifícios de apartamentos.

Quadro 2.9 - Alguns resultados do programa HOPE (*Health Optimisation Protocol for Energy-Efficient Buildings*) em apartamentos (adaptado de [2.35] e [2.36]).

Item		Média	Item	Provavelmente presente[(b)]	Presente[(b)]
Prevalência de sintomas SED	Nariz bloqueado	33%	Baixa concentração de CO	76%	9%
	Letargia, fadiga	39%	Infecção a partir do edifício	82%	0%
Prevalência de doenças declaradas e alergias	Rinite alérgica	56%	Infecção a partir dos ocupantes	94%	0%
	Enxaqueca	53%	Ozono	3%	0%
	Problemas de pele além de eczemas	51%	COVs não carcinogéneos	21%	79%
	Bronquite	51%	COVs carcinogéneos	59%	6%
Qualidade do ar - média Verão/Inverno (escala de 1 a 7)[(a)]		2,95	Fungos	50%	50%
Conforto térmico - média Inverno/Verão (escala de 1 a 7)[(a)]		2,87	Partículas	56%	41%

Notas:
- a: 1- satisfeito; 7- insatisfeito;
- b: os valores apresentados dizem somente respeito ao grupo de edifícios classificados como “Red”.

O mesmo estudo (HOPE) também envolveu Portugal, onde foram analisados 10 edifícios de apartamentos, com 639 apartamentos ocupados, e 12 edifícios de escritórios. Recolheram-se 352 inquéritos a adultos ocupantes dos apartamentos, com os seguintes resultados médios mais significativos:

- qualidade do ar - Inverno (escala de 1, satisfeito, a 7, insatisfeito): 3,08;
- qualidade do ar - Verão: 2,84;
- qualidade do ar - média Inverno/Verão: 2,96;
- conforto térmico - Inverno: 3,17;
- conforto térmico - Verão: 2,64;
- conforto térmico - média Inverno/Verão: 2,91.

Pela análise dos resultados, pode concluir-se que em relação aos parâmetros de qualidade do ar e conforto térmico as habitações portuguesas têm níveis de conforto semelhantes às europeias.

2.3. VENTILAÇÃO

A qualidade do ar interior pode ser controlada, quer através de uma estratégia de controlo na fonte[10], quer através da implementação de estratégias de ventilação (do latim *Ventilare*: expor-se ao vento) adequadas, a saber [2.1]:

- exaustão localizada: extracção dos poluentes junto à fonte de emissão (ex.: "hottes”);
- diluição: diluição da concentração dos poluentes interiores através da insuflação de ar novo no espaço e consequente extracção do ar interior "viciado";
- remoção: remoção dos poluentes interiores por filtragem. A filtragem aparece geralmente associada ao sistema de ventilação que promove também a diluição.

O controlo na fonte deve ser privilegiado, já que evita a geração dos poluentes. No entanto, apesar de todo o rigor com que uma estratégia de controlo na fonte seja implementada, será sempre impossível evitar a existência de fontes de emissão de poluentes nos espaços interiores. Assim, correntemente, a ventilação surge como uma estratégia fundamental no controlo da qualidade do ar interior, devendo privilegiar-se a extracção localizada quando em presença de fontes de emissão intensas e pontuais, como é caso da cozinha. A diluição e remoção deverão ser encaradas como mecanismos para a eliminação dos poluentes gerados de uma forma dispersa.

A taxa de ventilação respeitante ao critério de saúde pode ser obtida pela seguinte equação [2.11]:

$$q = \frac{s}{c_\infty - c_\mathrm{e}} \tag{2.3}$$

em que:

- q: caudal volúmico de ar exterior [l/s];

[10] Minimização das fontes emissoras recorrendo a materiais de construção e revestimento e a mobiliários que apresentem baixos níveis de emissão de poluentes.

- s: caudal volúmico emitido pelo poluente [l/s];
- $c_{\infty:}$: valor-limite para a concentração do poluente [-];
- $c_{e:}$ concentração do poluente no exterior [-].

Equação semelhante também existe para o critério sensorial.

O limite superior das taxas de ventilação é estabelecido, se existir, tendo em conta critérios de conservação de energia. Para estabelecer o limite inferior, existem correntemente duas metodologias (adaptado de [2.37] e [2.38]):

- método prescritivo: definição de um caudal de ventilação de ar novo, usualmente expresso por unidade de área, unidade de volume (esta definição dá origem ao parâmetro renovações horárias - *RPH* [h^{-1}]) ou por pessoa. Adicionalmente, poderá haver outras formas de prescrição para situações específicas, tais como o caudal de ar novo necessário para os aparelhos de combustão, normalmente expresso em função da potência do aparelho, ou a instalação de um dispositivo que poderá assegurar o caudal requerido, caracterizado pelas dimensões da área permanente ou controlável de uma abertura para ventilação natural;
- método exigencial: definição dos limites da concentração dos potenciais poluentes ou odores de modo a limitar a exposição máxima.

No método prescritivo os requisitos são assegurados por soluções concretas evitando-se a especificação dos reais objectivos a cumprir. Estes requisitos são normalmente pouco complexos e fáceis de entender pelos projectistas e instaladores. No entanto, esta metodologia pode restringir a inovação, nomeadamente, em termos de novos sistemas [2.39].

O método exigencial recorre a dois critérios referidos no §2.2.1: critério sensorial e de saúde. Durante muitos anos, as taxas de ventilação eram baseadas na concentração de CO_2 de origem metabólica (critério sensorial), no pressuposto de que a ocupação humana era a causa fundamental de degradação do ambiente interior. Mais recentemente, chegou-se à conclusão de que o próprio edifício é uma fonte apreciável de poluição [2.40]. Sendo assim, além dos ocupantes, todas as fontes devem ser tidas em conta. Este método, se bem

utilizado, tem vantagens sobre o método prescritivo [2.38]: obriga a obter e fornecer informação sobre os sistemas de ventilação e AVAC e permite atacar o problema da maneira mais eficiente, através do controlo na fonte. Conjugando estes factores, obtêm-se taxas de ventilação inferiores e um consumo mais racional (inferior) de energia.

O método exigencial é de mais difícil aplicação pois requer o conhecimento de vários parâmetros, nomeadamente, a localização e a emissão (variável no tempo) de todas as possíveis fontes interiores de poluição e o tempo que as pessoas passam no interior, em diferentes edifícios ou em diferentes zonas do mesmo edifício [2.38]. Acresce também o facto de que este método se debate com a tarefa de controlar um largo número de poluentes. Assim, a taxa de ventilação necessária para manter estes poluentes a um nível aceitável é difícil de estabelecer devido a que a percepção e efeitos biológicos da mistura de poluentes no ser humano podem ser diferentes daquelas obtidas com a análise de cada poluente separadamente [2.8], [2.22], [2.24].

Face às dificuldades em aplicar o método exigencial, recentemente adoptou-se em normalização internacional uma metodologia simplificada (com um carácter prescritivo, embora mais detalhado), em que se adoptam valores-tipo de caudal de ar novo para obstar à poluição devida ao edifício (proporcional à área) e aos ocupantes (proporcional ao respectivo número) e simultaneamente se recorre à adopção de categorias de ventilação em função do número de insatisfeitos [2.7].

Na prática, recorre-se à prescrição de renovações por hora (*RPH* [h^{-1}]) para toda a habitação ou renovações/caudais volúmicos para compartimentos específicos, com base na sua ocupação ou nas actividades que aí se desenvolvem. Conforme referido no §2.2.4.2, a humidade relativa é frequentemente o factor determinante no estabelecimento dos caudais de extracção nos compartimentos de serviço (cozinhas e instalações sanitárias). As admissões situam-se nos compartimentos principais (quartos e salas) de modo a prover oxigénio metabólico e diluir poluentes e odores dos ocupantes [2.41].

Apresenta-se no Quadro 2.10 um resumo das principais prescrições de ventilação para edifícios habitacionais em vários países.

Quadro 2.10 - Resumo de prescrições de ventilação para edifícios habitacionais (adaptado de [2.4], [2.7], [2.8], [2.9], [2.15], [2.21], [2.41] e [2.42]).

País (Fonte)	Taxa de ventilação global	Salas	Quartos	Cozinha	Inst. sanitária com banho	Inst. sanitária sem banho
Bélgica (NBN D50-001, 1991)	3,6 $m^3/h \cdot m^2$	Ad.: 3,6 $m^3/h \cdot m^2$ Mín.: 75 m^3/h Máx.: 150 m^3/h	Ad.: 3,6 $m^3/h \cdot m^2$ Mín.: 25 m^3/h Máx.: 36 m^3/h	Ex.: 3,6 $m^3/h \cdot m^2$ Mín.: 50 m^3/h Máx.: 75 m^3/h	Ex.: 3,6 $m^3/h \cdot m^2$ Mín.: 50 m^3/h Máx.: 75 m^3/h	Ex.: 25 m^3/h
Dinamarca	> 0,5 *RPH*	Ad: A_{ab} com 30 cm^2/25 $m^2 A_{pav}$		Ad.: janela ou porta Ex.: 72 m^3/h	Ad.: janela ou porta Ex.: 54 m^3/h	Ad.: janela ou porta Ex.: 36 m^3/h
Finlândia	> 0,4 *RPH*	1,8 $m^3/h \cdot m^2$	Mín.: 14,4 $m^3/h \cdot p$ ou 2,52 $m^3/h \cdot m^2 A_{pav}$	Ex.: 72 m^3/h	Ex.: 54 m^3/h	
França				75-135 m^3/h (inter.) 20-45 m^3/h (cont.)	15-30 m^3/h	15-30 m^3/h
Alemanha	< 50 m^2 e até 2 ocupantes: Mín.: 60 m^3/h Total: 60 m^3/h	1,0-1,5 *RPH*		Base: 40 m^3/h (>12 h ocupação/dia) Global: 60 m^3/h	40 m^3/h (>12 h ocupação/dia) Global: 60 m^3/h	20 m^3/h (>12 h ocupação/dia) Global: 30 m^3/h
	< 80 m^2 e até 4 ocupantes: Mín.: 90 m^3/h Total: 120 m^3/h			Máx.: 200 m^3/h (>12 h ocupação/dia) Global: 200 m^3/h		
	> 80 m^2 e até 6 ocupantes: Mín.: 120 m^3/h Total: 180 m^3/h			Kitchenet: 40 m^3/h (>12 h ocupação/dia Global: 60 m^3/h		
Noruega	> 0,5 *RPH*	Ad.: possibilidade abrir janelas ou A_{ab} > 1 dm^2 nas paredes exteriores	Ad.: possibilidade abrir janelas ou A_{ab} > 1 dm^2 nas par. exteriores	Ex.: VM com 60 m^3/h ou VN com conduta de 150 cm^2 a sair acima telhado	Ex.: VM com 60 m^3/h ou VN com conduta de 150 cm^2 a sair acima telhado	Ex.: VM com 40 m^3/h ou VN com conduta de 100 cm^2 a sair acima telhado
Suécia (BFS 1988:38)	1,3 $m^3/h \cdot m^2 A_{pav}$		14,4 $m^3/h \cdot p$	Ex.: 36 m^3/h	36 m^3/h com poss. abrir janelas ou 36 m^3/h com caudal máx. de 108 m^3/h ou 54 m^3/h sem poss. abrir janelas	
Reino Unido (Reg. de edifícios: documento F, 2006)	20 $m^3/h \cdot p$ e > 1,08 $m^3/h \cdot m^2$ + infiltrações 0,15 *RPH*	Ad. > 90 cm^2/p Máx.: abertura janelas (4 *RPH*)	Ad. > 90 cm^2/p Máx.: abertura janelas (4 *RPH*)	Ex.: 108 m^3/h junto ao fogão ou 216 m3/h noutro lugar (inter.) ou 47 m^3/h (cont.)	Ex.: 54 m^3/h (inter.) ou 29 m^3/h (cont.)	Ex.: 21,6 m^3/h
EUA (ASHRAE 62.1:2007)	9 $m^3/h \cdot p$+ 1,08 $m^3/h \cdot m^2$ VN: A_{jan} > 4% A_{pav}			VM[(a)]: 180 m^3/h (inter.), 90 m^3/h (cont.) ou poss. abrir janelas	Poss. abrir janelas	VM: 90 m^3/h (inter.), 45 m^3/h (cont.) ou poss. abrir janelas

Notas:

- Abreviaturas: Ad. - Admissão; Ex. - Exaustão; Max. - Máximo; Mín. - Mínimo; cont. - Contínuo; int. - Intermitente; A_{ab} - Área abertura; A_{pav} - Área pavimento; A_{jan} - Área janela; VN - Ventilação natural; VM - Ventilação mecânica;
- a: é necessário prever caudal de admissão de ar para os aparelhos de combustão tipo A e B;
- b: quando existirem aparelhos de combustão do tipo B e quando o caudal global exceder 270 m^3/h é necessário uma abertura de ar de compensação;
- c: os valores apresentados referem-se à classe II;
- d: é necessário prever caudal de admissão de ar para os aparelhos de combustão tipo A (4,3·Potência nominal [kW] m^3/h) e B (5·Potência nominal [kW] m^3/h).

Quadro 2.10 - Resumo de prescrições de ventilação para edifícios habitacionais (adaptado de [2.4], [2.7], [2.8], [2.9], [2.15], [2.21], [2.41] e [2.42]) (Continuação).

País (Fonte)	Taxa de ventilação global	Salas	Quartos	Cozinha	Inst. sanitária com banho	Inst. sanitária sem banho
EUA (ASHRAE 62.2:2007, aplicável a moradias ou edifícios multi-familiares até 3 pisos)	$0{,}05 \cdot A_{pav} + 3{,}5 \cdot$(n.º quartos+1) + infiltrações $36 m^3/h/100 m^2 A_{pav}$	$A_{jan} > 4\% \cdot A_{pav} > 0{,}5\ m^2$	$A_{jan} > 4\% \cdot A_{pav} > 0{,}5\ m^2$	VM[(b)]: 180 m^3/h (inter.), 5 *RPH* (cont.) + $A_{jan} > 4\% \cdot A_{pav} > 0{,}5\ m^2$	VM: 90 m^3/h (inter.), 36 m^3/h (cont.)	$A_{jan} > 4\% \cdot A_{pav} > 0{,}15\ m^2$
Europa[(c)] (EN 15 251: 2007)	0,6 *RPH*	Ad.: 25,2 $m^3/h \cdot p$ ou 3,6 $m^3/h \cdot m^2$	Ad.: 25,2 $m^3/h \cdot p$ ou 3,6 $m^3/h \cdot m^2$	Ex.: ≥ 72 m^3/h	Ex.: ≥ 54 m^3/h	Ex.: ≥ 36 m^3/h
Portugal (NP 1037-1: 2002)		Ad. (VN): > 30 m^3/h e 1 *RPH*; com lareira > 4 *RPH*	Ad. (VN): > 30 m^3/h e 1 *RPH*	Ex. (VN)[(d)]: > 60 m^3/h e 4 *RPH*	Ex. (VN): > 45 m^3/h e 4 *RPH*	Ex. (VN): > 30 m^3/h e 4 *RPH*
Portugal (RSECE-2006)		30 $m^3/h \cdot p$ (não fumadores), 60 $m^3/h \cdot p$ (fumadores)	30 $m^3/h \cdot p$ (não fumadores), 60 $m^3/h \cdot p$ (fumadores)			
Portugal (RCCTE-2006)	0,6 *RPH*					

Notas:
- Abreviaturas: Ad. - Admissão; Ex. - Exaustão; Max. - Máximo; Mín. - Mínimo; cont. - Contínuo; int. - Intermitente; A_{ab} - Área abertura; A_{pav} - Área pavimento; A_{jan} - Área janela; VN - Ventilação natural; VM - Ventilação mecânica;
- a: é necessário prever caudal de admissão de ar para os aparelhos de combustão tipo A e B;
- b: quando existirem aparelhos de combustão do tipo B e quando o caudal global exceder 270 m^3/h é necessário uma abertura de ar de compensação;
- c: os valores apresentados referem-se à classe II;
- d: é necessário prever caudal de admissão de ar para os aparelhos de combustão tipo A (4,3·Potência nominal [kW] m^3/h) e B (5·Potência nominal [kW] m^3/h).

Os sistemas de ventilação intermitentes (ventilação mecânica accionada de acordo com as necessidades de remoção de poluentes) necessitam de maiores caudais, conforme se pode constatar no Quadro 2.10 para o caso particular dos EUA. Neste caso, a norma ASHRAE 62.2: 2007 [2.42] obriga a um funcionamento no mínimo de 1 hora em cada 12 horas, o que corresponde a 0,35 *RPH* [2.43]. Para o caso corrente em Portugal de funcionamento intermitente com ciclos de 24 horas (somente com funcionamento ao jantar), é indicado para 0,70 *RPH* (valor presumivelmente médio nas habitações portuguesas) um tempo máximo de subventilação de 8 horas por dia o que se afasta bastante da realidade existente [2.43]. Na norma ASHRAE 62.2: 2007 [2.42], pode-se dimensionar o caudal de extracção para um funcionamento intermitente, o que conduz para o caso anterior a caudais muito elevados.

Apresenta-se no Quadro 2.11 as diferentes tipologias consideradas para efeitos de comparação de alguns critérios constantes do Quadro 2.10 (adaptado de [2.13]).

Quadro 2.11 - Dimensões das diferentes tipologias consideradas na análise comparativa.

	Tipologia						
Dados de base	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Àrea de pavimento total [m^2]	37	55	67	86	108	132	154
Área compartimentos principais [m^2]	20	34	46	58	80	97	114
Área cozinha [m^2]	10	10	10	10	10	10	10
Área casas de banho [m^2]	5	5	5	10	10	15	20
Área da sala [m^2]	20	20	20	20	30	35	40
Área dos quartos [m^2]	0	14	26	38	50	62	74
Número de quartos	1	1	2	3	4	5	6
Número de compart. principais	1	2	3	4	5	6	7
Número de casas de banho	1	1	1	2	2	3	4
Volume dos compart. principais [m^3]	48	82	110	139	192	233	274
Volume das casas de banho [m^3]	12	12	12	24	24	36	48
Volume da cozinha [m^3]	24	24	24	24	24	24	24
Volume total [m^3]	89	133	162	207	259	316	369

Na Figura 2.1 apresenta-se, para as tipologias anteriores, o valor das renovações horárias obtidas (adaptado de [2.13]).

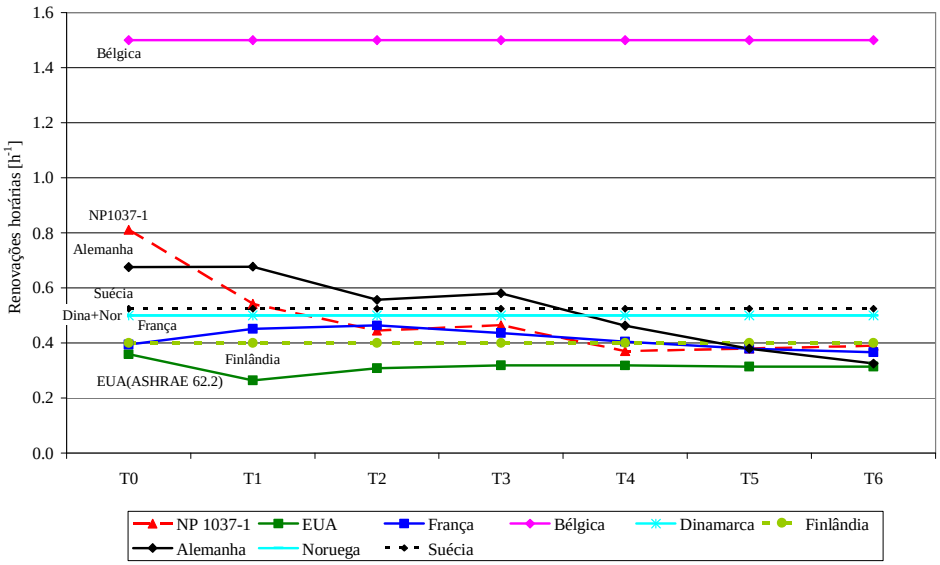


Figura 2.1 - Estimativa das taxas de ventilação correspondentes ao caudal base.

Pela análise da Figura 2.1, pode concluir-se que, à excepção das pequenas habitações, as renovações horárias tendem para um valor médio de 0,4 *RPH* (excepto na Bélgica).

2.4. CONFORTO TÉRMICO

2.4.1. EQUILIBRIO TÉRMICO E TROCAS DE CALOR

De um ponto de vista geral, a sensação de conforto térmico pode ser definida como "*o estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico*" [2.20]. Por outras palavras, uma pessoa está termicamente confortável quando não sente nem calor nem frio.

O conforto térmico resulta das condições de trocas de calor existentes entre o corpo humano e o ambiente. Uma das exigências para o bem-estar e conforto é manter o equilíbrio térmico entre o corpo humano e o meio ambiente. Isso implica conservar a temperatura interior do corpo à temperatura aproximada de 37ºC (nas condições correntes de temperatura há sempre uma perda de calor do corpo), independentemente das variações das condições ambientais. No entanto, o equilíbrio térmico não deve ser confundido com o conforto térmico, já que pode ser atingido o equilíbrio térmico sob condições de desconforto, graças aos mecanismos de termoregulação do corpo humano. Assim, de um ponto de vista puramente fisiológico pode dizer-se que existe conforto térmico quando "as condições sob as quais os mecanismos termoreguladores do corpo humano se encontram num estado de actividade mínima" [2.44].

As trocas de calor entre o corpo humano e o meio ambiente realizam-se através dos seguintes modos [2.1]:

- convecção: calor trocado para o ambiente devido à diferença de temperatura entre a pele/roupa e o ar ambiente;
- radiação: calor trocado directamente entre a pele/roupa e as superfícies envolventes devido às respectivas diferenças de temperatura;
- respiração: calor trocado com o ambiente devido à diferença de temperatura entre o ar que se inspira e o ar que se expira;
- evaporação: calor dissipado para o ambiente pela evaporação de água à superfície da pele.

Enquanto nos três primeiros modos o sentido das trocas de calor depende do sentido do gradiente térmico, o fluxo térmico por evaporação é sempre uma perda de calor humano para o meio ambiente.

2.4.2. CONDIÇÕES DE CONFORTO TÉRMICO GLOBAL

Como qualquer organismo vivo, o Homem produz e troca calor com o meio ambiente. A produção de energia é obtida a partir dos alimentos consumidos por intermédio do seu metabolismo e segundo uma taxa, *M*, que depende da actividade física do indivíduo [2.44].

Da energia produzida pelo corpo humano só uma pequena parte é convertida em trabalho mecânico, *W*, sendo a maior parte dissipada sob a forma de calor. Considerando o corpo humano como "uma máquina térmica", pode dizer-se que ele tem um baixo rendimento mecânico, sendo nulo para muitas actividades ($W = 0$) [2.44].

Tendo em conta a produção de energia pelo organismo humano e os modos de trocas térmicas referidos no ponto anterior, a equação geral que gere o processo termodinâmico das trocas energéticas entre o corpo humano e o meio ambiente define-se da forma seguinte [2.45]:

$$S = M - W \pm R \pm C \pm K - E \pm Res \tag{2.4}$$

Os termos da equação anterior são apresentados na Figura 2.2, com as unidades em W/m^2. (*S* representa a acumulação de calor no corpo, sendo nulo quando em equilíbrio térmico). Em termos simples, as perdas de calor sensível dependem da diferença de temperatura entre o corpo e o ambiente, as perdas de calor latente, associadas à transformação de fase, dependem da diferença de concentração de vapor de água.

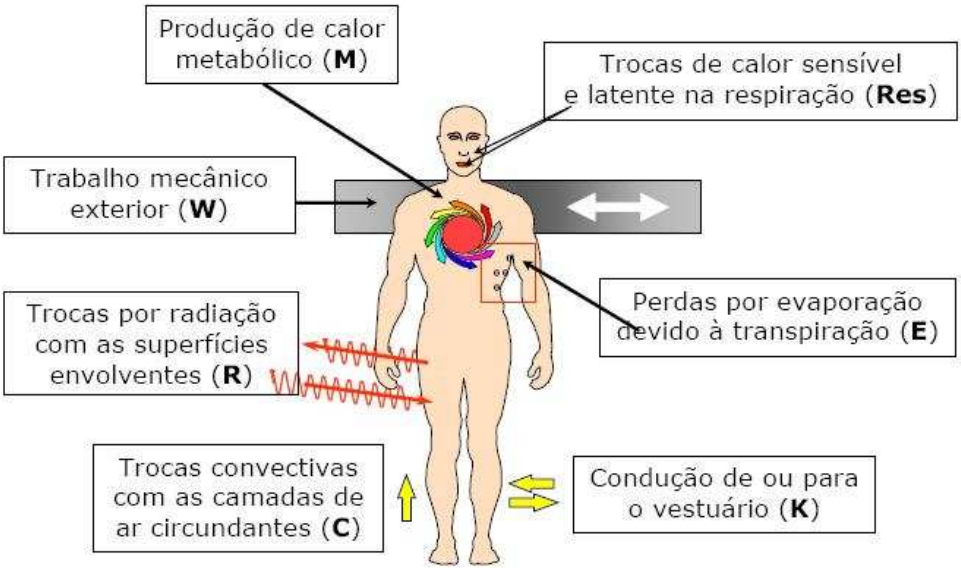


Figura 2.2 - Balanço térmico do corpo humano [2.45].

As sensações térmicas do Homem referem-se principalmente ao estado térmico da globalidade do seu corpo, sendo este estado influenciado por dois tipos de factores [2.10]:

- factores individuais (dependentes do indivíduo):
    - actividade física;
    - vestuário.
- factores ambientais:
    - temperatura do ar - T_{ar} [ºC];
    - temperatura média radiante - T_{mr} [ºC];
    - velocidade relativa do ar - v_{ar} [m/s];
    - pressão parcial do vapor de água - p_v [Pa].

Relativamente aos factores individuais, refira-se que a actividade física desenvolvida por um indivíduo pode ser quantificada pela taxa de metabolismo, *M*, que representa a produção de calor metabólico. A unidade utilizada para a taxa de metabolismo é designada por *met*, correspondendo 1 *met* (situação de repouso, acordado) a uma produção de calor por unidade de superfície do corpo humano igual a 58,2 W/m^2 [2.46].

No que diz respeito ao segundo factor individual, o vestuário, salienta-se que este constitui uma resistência térmica que dificulta as trocas de calor entre o corpo humano e o meio ambiente. A resistência térmica convencional do vestuário, I_{CL}, expressa-se numa unidade denominada de *clo*, sendo 1 *clo* (vestuário típico para Inverno) equivalente a 0,155 $m^2 \cdot C/W$ [2.46].

2.4.3. ESPECIFICAÇÃO DE CONDIÇÕES DE CONFORTO TÉRMICO

Uma forma simplificada de especificar as condições ambientes satisfatórias recorre apenas à temperatura do ar, T_{ar} - índice directo. No RCCTE [2.20] estabelecem-se as temperaturas de referência de 20°C e de 25°C, respectivamente, para as estações de aquecimento (Inverno) e de arrefecimento (Verão).

Um parâmetro mais complexo, frequentemente utilizado para especificar as condições ambientes é a temperatura operativa, T_{op} - índice racional. A temperatura operativa é uma temperatura fictícia que procura integrar de uma forma global as condições ambientes, combinando a influência da temperatura do ar ambiente, T_{ar}, da temperatura média radiante, T_{mr}, e da velocidade do ar, v_{ar}. Em termos numéricos, a temperatura operativa é dada pela expressão [2.20]:

$$T_{op} = AT_{ar} + (1 - A)T_{mr} \tag{2.5}$$

em que A é função da velocidade do ar.

Para valores correntes da velocidade do ar (< 0,2 m/s), a expressão anterior reduz-se simplesmente a uma média entre as temperaturas radiante e ambiente. Para locais com reduzidas assimetrias (isolamento térmico homogéneo da envolvente e áreas de envidraçados exteriores não muito grandes), a T_{op} é aproximadamente igual à temperatura ambiente [2.20].

As tentativas de exprimir, sob a forma de um único parâmetro, os efeitos combinados dos diversos factores ambientais e individuais sobre as respostas fisiológicas e sensoriais de um indivíduo conduziram ao desenvolvimento de índices térmicos.

Esses índices procuram integrar a influência de vários parâmetros que afectam o conforto térmico. Dos vários índices existentes, destacam-se dois (índices empíricos) [2.46]:

- voto médio previsível: *PMV* (*Predicted Mean Vote*);
- percentagem previsível de insatisfeitos: *PPD* (*Predicted Percentage Dissatisfied*).

O estabelecimento de exigências para obter condições de conforto térmico faz-se, em regra, definindo limites admissíveis para os parâmetros de que depende a sensação de conforto (ex.: temperatura do ar) ou ainda para os índices acima referidos.

A obtenção do índice *PMV* consistiu na adaptação da solução da equação de equilíbrio térmico entre o corpo humano e o ambiente aos resultados experimentais e permite caracterizar a sensação térmica de um indivíduo (como um todo) a partir da estimativa dos factores individuais (actividade e vestuário) e da medição dos factores ambientais (T_{ar}, T_{mr}, p_v e v_{ar}). Este índice, aplicável em ambientes térmicos moderados, é descrito na norma internacional ISO 7730: 2005 [2.46]. O índice *PMV* quantifica a opinião média dum grupo de pessoas relativamente a um dado ambiente, expressando as respectivas sensações térmicas de acordo com uma escala de sete níveis, apresentada no Quadro 2.12.

Quadro 2.12 - Escala de sensação térmica [2.46].

Escala	Sensação térmica
+3	Muito quente
+2	Quente
+1	Ligeiramente quente
0	Neutro
-1	Ligeiramente fresco
-2	Fresco
-3	Frio

Uma vez que o índice *PMV* exprime a média de um grupo de indivíduos, será útil prever o número de pessoas que se sentem desconfortáveis para um dado *PMV*. Sendo assim, o índice *PPD* procura estabelecer uma previsão da percentagem de pessoas insatisfeitas com

as condições térmicas, isto é, a percentagem de pessoas que escolheriam os valores +3, +2, -2 ou -3, (Quadro 2.12), para descrever a sua sensação térmica. A partir do índice *PMV*, pode determinar-se o índice *PPD* através da equação representada graficamente na Figura 2.3.

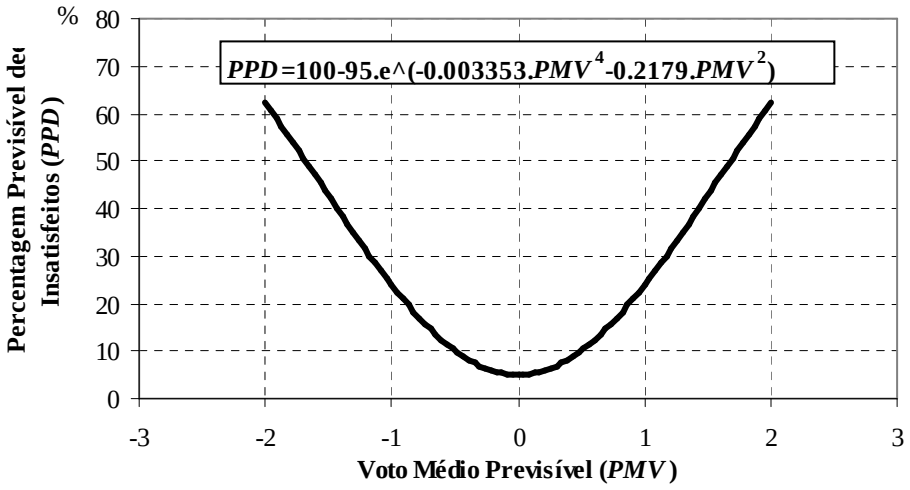


Figura 2.3 - *PPD* em função de *PMV* (adaptado de [2.20]).

Em face das diferenças entre indivíduos, é impossível especificar condições de conforto que satisfaçam em simultâneo todos os ocupantes de um mesmo edifício. Haverá sempre uma percentagem de ocupantes insatisfeitos, no mínimo 5% (Figura 2.3). Também as prioridades para as condições locais, nacionais ou técnicas poderão levar à adopção de níveis de conforto diferenciados, por exemplo em função do tipo de espaços. Sendo assim, a norma ISO 7730: 2005 [2.46] estabelece três categorias de conforto térmico global (ver Quadro 2.13). Os valores propostos pela norma ASHRAE 55: 2004 [2.20] são coincidentes com a classe B do mesmo quadro.

Quadro 2.13 - Categorias de ambiente térmico global [2.46].

Categoria	Estado térmico global do corpo	
	PPD [%]	*PMV*
A	< 6	-0,2 < *PMV* < +0,2
B	< 10	-0,5 < *PMV* < +0,5
C	< 15	-0,7 < *PMV* < +0,7

O estabelecimento de critérios de conforto recorrendo a níveis de temperatura operativa ou através do índice *PMV* são métodos exigenciais, como já exposto, preferíveis em relação ao método prescritivo [2.39].

2.4.4. DESCONFORTO LOCAL

A sensação de conforto térmico descrita no §2.4.2 referiu-se sempre ao estado térmico da globalidade do corpo, o que não é suficiente. Um indivíduo pode considerar que a temperatura ambiente está agradável, mas sentir-se desconfortável em consequência, quer de uma corrente de ar, quer de calor excessivo numa zona localizada do corpo. Situações deste tipo denominam-se de "desconforto local" e afectam essencialmente pessoas em actividade sedentária [2.44]. Os factores que provocam o desconforto local são:

- assimetria de temperatura radiante;
- velocidade do ar;
- temperatura do pavimento demasiado elevada ou baixa;
- diferenças de temperatura do ar na vertical.

Numa situação em que um indivíduo está sentado de costas para um envidraçado numa sala devidamente aquecida e sente frio nas costas, verifica-se uma situação de desconforto localizado causado por uma assimetria de temperatura radiante. Assimetria radiante define-se como a diferença entre a temperatura radiante em dois lados opostos de uma pessoa. Os dados disponíveis referem-se somente a pessoas sentadas e estas são mais sensíveis a assimetrias radiantes provocadas por tectos quentes e paredes frias [2.20], [2.46].

Uma corrente de ar é sentida por um indivíduo quando parte do corpo está exposto a uma velocidade excessivamente elevada do ar causando um arrefecimento do corpo (perdas por convecção). A corrente de ar é uma das maiores fontes de queixas e pode ser quantificada através de um parâmetro denominado de "taxa de corrente de ar", *DR* [%] (*Draught risk*), que permite estimar a percentagem de pessoas que é incomodada por uma corrente de ar. A taxa de corrente de ar pode ser calculada através da equação empírica [2.20], [2.46]:

$$DR = (34 - T_{ar})(v_{ar} - 0{,}05)^{0{,}62}(0{,}37 v_{ar} T_u + 3{,}14) \quad (2.6)$$

em que:

- T_{ar}: temperatura do ar [ºC] (20ºC < T_{ar} < 26ºC);
- v_{ar}: velocidade média do ar [m/s] (v_{ar} < 0,5 m/s);
- T_u: intensidade da turbulência local definida como sendo a razão entre o desvio padrão da velocidade e a velocidade média no local, em % (10% < T_u < 60%).

No caso particular de temperaturas elevadas (estação de arrefecimento; T_{ar} > 26ºC), a velocidade do ar pode ser benéfica (nomeadamente através do controlo pessoal da abertura de janelas ou ventiladores no tecto), pois pode permitir temperaturas maiores que a temperatura de conforto. Para actividade sedentária (1,2 met), a temperatura pode ser superior à temperatura de conforto no máximo em 3ºC e a velocidade média deve ser no máximo de 0,82 m/s [2.46].

Se a temperatura do pavimento estiver demasiadamente elevada ou demasiadamente baixa, um indivíduo pode sentir-se desconfortável por ter os pés quentes ou frios demais. Para pessoas que usem calçado “leve” o tipo de material de revestimento é indiferente. No entanto, para pés descalços, recomenda-se o uso de revestimentos têxteis ou de madeira [2.10], [2.46].

Deve notar-se que o desconforto local pode ser mais crítico do que o desconforto global devido a um inadequado estado térmico global do corpo, uma vez que a insatisfação admissível é menor (como é caso das diferenças de temperatura do ar na vertical ou da assimetria de radiação) [2.3].

No Quadro 2.14 apresentam-se as várias categorias de conforto local segundo a norma ISO 7730: 2005 [2.46]. Para a assimetria radiante os valores apresentados referem-se ao caso de parede fria. Os valores propostos pela norma ASHRAE 55: 2004 [2.20] são coincidentes com a classe B do Quadro 2.14.

Quadro 2.14 - Categorias de ambiente térmico local (adaptado de [2.46]).

Categoria	Desconforto local						
	DR [%]	Diferença de temperatura do ar na vertical		Pavimento quente ou frio		Assimetria de radiação - parede fria	
		PD [%]	Variação	*PD* [%]	Variação	*PD* [%]	Variação
A	< 10	< 3	< 2ºC	< 10	19 a 29ºC	< 5	< 10ºC
B	< 20	< 5	< 3ºC	< 10	19 a 29ºC	< 5	< 10ºC
C	< 30	< 10	< 4ºC	< 15	17 a 31ºC	< 0	< 13ºC

Nota:
- *PD*: percentagem de insatisfeitos (*Percentage Dissatisfied*).

Relativamente às condições de desconforto local, a regulamentação portuguesa, RSECE [2.9], somente especifica que a velocidade do ar interior não deve exceder os 0,2 m/s e os desequilíbrios radiativos devem ser compensados.

Deve notar-se que as condições de conforto devem somente ser estabelecidas na chamada zona ocupada. O RSECE [2.9] define esta como o espaço desde o nível do pavimento até cerca de 2 m acima deste. No entanto, existem definições mais restritivas [2.20], [2.48].

O levantamento em Portugal das condições de desconforto localizado é quase inexistente. No entanto, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) tem realizado algumas medições, nomeadamente, a realizada durante o Inverno de 2003 num apartamento habitado, sem sistema de aquecimento e com ventilação natural. Mediram-se a taxa de corrente de ar (*DR*) e a assimetria de temperatura radiante. Os resultados obtidos não demonstraram condições de desconforto local (assimetria máxima de 0,5ºC e *DR* e v_{ar} nulas) [2.47].

2.4.5. MODELOS ADAPTATIVOS

A comparação entre a sensação de conforto obtida em situações reais e o modelo *PMV* tem demonstrado discrepâncias de resultados (normalmente o modelo *PMV* sobrestima o desconforto) [2.49]. A sensação de conforto não corresponde a um simples balanço de energia, pois a sensação térmica tem não só componente sensorial, mas também uma componente psicológica (no modelo *PMV* há sempre uma percentagem de ocupantes insatisfeitos: no mínimo 5%). Sendo assim, estas discrepâncias podem ser explicadas pela

não contabilização de alguns factores no modelo *PMV* ou pelos erros na contabilização da actividade e vestuário ou simplesmente por ser um modelo estático [2.49].

Uma das grandes críticas que tem sido apontada ao modelo apresentado é que este foi obtido em condições controladas (câmaras climáticas) e por conseguinte não entra em conta, nomeadamente, com os efeitos da temperatura exterior e factores adaptativos. Existem essencialmente três factores de adaptação [2.49]:

- fisiológicos (aclimatização): respostas biológicas a exposições prolongadas com condições térmicas extremas (ex.: alteração das temperaturas internas a partir das quais funciona a termoregulação);
- comportamentais (ajustamentos): acções conscientes ou inconscientes para manter o equilíbrio térmico;
- psicológicos (habituação e expectativas): atenuação/controlo da percepção das condições físicas devido a experiências e expectativas do passado.

Os factores anteriores estão reflectidos no princípio adaptativo [2.50]: "*Se ocorre uma mudança que provoque desconforto, as pessoas reagem de uma forma que tende a restaurar o seu conforto*". O princípio corresponde na prática às seguintes acções (ou oportunidades de adaptação) [2.50]:

- ajustamentos na temperatura de conforto através de mudanças no vestuário, actividade, postura, ingestão de bebidas, etc., de modo a que os ocupantes se sintam confortáveis sobre as condições prevalecentes;
- ajustamentos nas condições interiores através do uso ou controlo de janelas/portas, sombreamentos e ventiladores. Os ocupantes também podem deslocar-se no interior do compartimento de modo a obterem melhores condições.

De modo a tentar entrar em conta com outros factores, além do simples balanço térmico, têm-se desenvolvido modelos adaptativos em que a principal variável é a temperatura exterior. Um modelo adaptativo pode ser definido como "*um modelo que relaciona a temperatura interior ou a gama de temperaturas aceitáveis com o clima exterior*" [2.20]. Estes tipos de modelos foram obtidos em condições reais e aplicam-se somente à estação

de arrefecimento e a edifícios ventilados naturalmente, em que os ocupantes têm actividades sedentárias e a possibilidade de adaptar o vestuário às condições térmicas interiores e exteriores e acesso e controlo ao uso de janelas. Em edifícios de habitação as oportunidades de adaptação são particularmente livres e fáceis de conseguir, nomeadamente, através da alteração da actividade metabólica e do vestuário. À semelhança do modelo *PMV*, também neste caso a normalização existente especifica classes de conforto. Apresenta-se na Figura 2.4 o modelo da norma ASHRAE 55: 2004 [2.20] com duas classes de conforto (80 e 90% de aceitabilidade/satisfação).

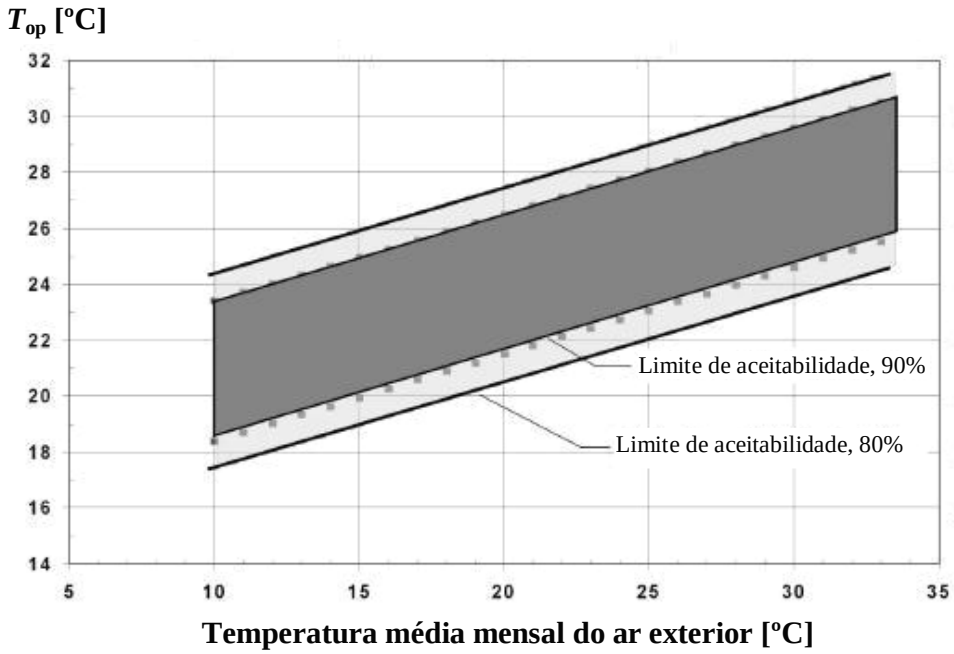


Figura 2.4 - Gama de temperaturas aceitáveis para edifícios ventilados naturalmente (adaptado de [2.20]).

Pela observação da figura anterior, constata-se que a possibilidade de adaptação permite obter temperaturas de conforto mais elevadas, dispensando assim o recurso a meios mecânicos de climatização, bem como uma gama de variação mais alargada.

Na norma EN 15 251: 2007 [2.7] é descrito um modelo semelhante, no entanto, apresenta três classes de aceitabilidade/satisfação e a temperatura operativa interior está relacionada

com uma média pesada da temperatura exterior dos últimos sete dias (com maior peso para os dias imediatamente anteriores ao dia em causa). Crê-se que este último modelo é mais realista pois tem em conta a adaptação a um passado recente.

Recomenda-se que quando se ultrapassarem os limiares de conforto (80 ou 90% de aceitabilidade/satisfação) se recorra aos sistemas AVAC de modo a manter estes limites [2.51]. Na norma EN 15 251:2007 recomenda-se que, quando a temperatura exterior estiver abaixo do limite inferior de aplicação do modelo, se recorra às classes de conforto do Quadro 2.13.

2.5. SÍNTESE CRÍTICA

A qualidade do ambiente interior em edifícios de habitação é uma matéria muito complexa. Neste capítulo fez-se uma reflexão da qual resultam as seguintes conclusões:

- na prossecução da qualidade do ar interior, devem respeitar-se simultaneamente dois critérios: critério de saúde e critério sensorial. Em Portugal, existe regulamentação que recorre essencialmente ao critério de saúde;
- o vapor de água é um dos poluentes mais significativos, devendo os níveis de humidade relativa no interior das habitações situar-se entre os 30 a 70%. Excepcionalmente, poderão aceitar-se períodos curtos, entre 1 a 2 horas, com níveis mais elevados;
- as habitações portuguesas apresentam níveis de conforto semelhantes às europeias;
- as taxas de ventilação são alcançadas recorrendo a dois métodos: método prescritivo e método exigencial. Embora o último seja preferencial, ainda não existe conhecimento suficiente para o aplicar, do que advém que se aplica genericamente o método prescritivo;
- a normalização e a regulamentação internacional para edifícios de habitação aponta para 0,4 a 0,5 renovações horárias, em média, excluindo as pequenas habitações;

- o sistema de ventilação mecânica intermitente usualmente empregue em Portugal pode levar a condições de subventilação;
- o conforto higrotérmico depende de vários parâmetros, estando regulamentadas em Portugal as condições de referência para a temperatura, a humidade relativa e a velocidade do ar;
- os modelos adaptativos têm um grande potencial de aplicação, especialmente nas condições de ventilação natural da grande maioria das nossas habitações.

De um modo geral, os estudos indicam a existência de um mecanismo de adaptação do Homem às condições ambientes (condições higrotérmicas, qualidade do ar, condições acústicas e de iluminação), tendo o Homem demonstrado preferência por ambientes "naturais" em que possa ter algum controlo sobre as respectivas condições.

Pretendeu-se, com este capítulo, evidenciar que só uma análise multidisciplinar pode contribuir para a melhoria da qualidade do ambiente interior em edifícios de habitação. Uma proposta de melhoria parcelar deve ser cautelosa, pois pode conduzir a maus resultados.

BIBLIOGRAFIA DO CAPÍTULO 2

[2.1] Comissão de Coordenação da Região do Norte e Universidade do Porto - Fundação Gomes Teixeira, Projecto Redene. Rede de Edifícios Energeticamente Eficientes. Conceitos e Orientações, 2000.

[2.2] Fanger, P., What is IAQ?, 10th Indoor Air Conference, Beijing, China, 2005.

[2.3] Viegas, J., Contribuição da Ventilação para a Qualidade do Ambiente Interior em Edifícios, Seminário Ambiente em Edifícios Urbanos, LNEC, Lisboa, 2000.

[2.4] IPQ, Ventilação e Evacuação dos Produtos da Combustão dos Locais com Aparelhos a Gás. Parte 1: Edifícios de Habitação. Ventilação Natural, Instituto Português da Qualidade, NP 1037-1, Monte da Caparica, 2002.

[2.5] WHO, Air Quality Guidelines for Europe, Second Edition, World Health Organization, Copenhagen, 2000.

[2.6] IPQ, Segurança e Saúde no Trabalho. Valores Limite de Exposição Profissional a Agentes Químicos, Instituto Português da Qualidade, NP 1796, Monte da Caparica, 2004.

[2.7] CEN, Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings. Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustic, EN 15 251, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2007.

[2.8] ASHRAE, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, Ansi/Ashrae Standard 62.1-2007, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA, 2007.

[2.9] Decreto-Lei n.º 79/2006, Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização (RSECE), 4 de Abril, Diário da República, I Série-A, Lisboa, 2006.

[2.10] ASHRAE, Fundamentals Handbook, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 2005.

[2.11] CEN, Ventilation for Buildings. Design Criteria for the Indoor Environment, CR 1752, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1998.

[2.12] Pinto, A., Sistemas de Climatização e Ventilação Mecânica, Seminário Ambiente em Edifícios Urbanos, LNEC, Lisboa, 2000.

[2.13] Pinto, A., Ventilação Mecânica de Edifícios de Habitação, LNEC, NCI, Relatório 01/2006, 2006.

[2.14] CEN, Ventilation for Buildings. Design and Dimensioning of Residential Ventilation Systems, CEN/TR 14 788, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2006.

[2.15] Office of the Deputy Prime Minister, The Building Regulations 2000 - Ventilation. Approved Document F - Means of Ventilation, London, 2006.

[2.16] ECA, Indoor Air Quality and the Use of Energy in Buildings, Report Nº 17, European Collaborative Action "Indoor Air Quality and its Impact on Man", Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1996.

[2.17] BSI, Code of Practice for Design of Buildings. Ventilation Principles and Designing for Natural Ventilation, BS 5 925, British Standards Institution, London, 1980.

[2.18] Dorer, V.; Pfeiffer, A.; Weber, A., Parameters for the Design of Demand Controlled Hybrid Ventilation Systems for Residential Buildings, Technical Note 59, Annex 5-AIVC, IEA-ECBCS, 2005.

[2.19] ECA, Guidelines for Ventilation Requirements in Buildings, Report Nº 11, European Collaborative Action "Indoor Air Quality and its Impact on Man", Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1992.

[2.20] ASHRAE, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Ansi/Ashrae Standard 55-2004, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA, 2004.

[2.21] Decreto-Lei n.º 80/2006, Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), 4 de Abril, Diário da República, I Série-A, Lisboa, 2006.

[2.22] Awbi, H., Ventilation of Buildings, 2nd Edition, E & FN Spon, 2003.

[2.23] Fraga, S.; Lopes, C.; Azeredo, P., O Monóxido de Carbono em nossas Casas, 8.º Seminário de Outono da Efriarc, Lisboa, 2004.

[2.24] Silva, G., Estudo de Emissões de COVs por Materiais usados em Interiores de Edifícios, Tese de Doutoramento Submetida à FCUP, 2000.

[2.25] ECA, Total Volatile Organic Compounds (TVOC) in Indoor Air Quality Investigations, Report Nº 19, European Collaborative Action "Indoor Air Quality and its Impact on Man", Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1997.

[2.26] Silva, G. *et al*, VOCs in Indoor Air in Several Schools of Porto, 8th Healthy Buildings Conference, Lisbon, Portugal, 2006.

[2.27] Silva, G. *et al*, Active *vs* Passive Sampling of VOCs in IAQ Fields Studies in Selected Energy-Efficient European Office and Residential Buildings, 10th Indoor Air Conference, Beijing, China, 2005.

[2.28] Carvalho, F. *et al*, Exposure to Ionizing Radiation and Dangerous Substances inside Buildings Related to Construction Products, 8th Healthy Buildings Conference, Lisbon, Portugal, 2006.

[2.29] ECA, Risk Assessment in Relation to Indoor Air Quality, Report Nº 22, European Collaborative Action "Indoor Air Quality and its Impact on Man", Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2000.

[2.30] ECA, Biological Particles in Indoor Environments, Report Nº 12, European Collaborative Action "Indoor Air Quality and its Impact on Man", Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1993.

[2.31] Levin, H., Indoor Air Pollutants. Part 1: General Description of Pollutants, Levels and Standards, VIP Nº 2, Annex 5-AIVC, IEA-ECBCS, 2003.

[2.32] Cano, M., Contaminação Microbiológica do Ar Interior, ASHRAE. Portugal Chapter. 2.º Seminário 2006: Ventilação e Qualidade do Ar, Lisboa, Portugal, 2006.

[2.33] Maroni, M.; Seifert, B.; Lindvall, T., Indoor Air Quality. A Comprehensive Reference Book, Elsevier, 1991.

[2.34] Spengler, J.; Samet, J.; McCarthy, J., Indoor Air Quality Handbook, McGraw-Hill, 2000.

[2.35] Johner, N. *et al*, Correlations Between SBS, Perceived Comfort, Energy use and other Building Characteristics in European Office and Residential Buildings, 10th Indoor Air Conference, Beijing, China, 2005.

[2.36] Roulet, C. *et al*, Health, Comfort, and Energy Performance in Buildings. Guidelines to Achieve them All, EU programme: Energy, Environment and Sustainable Development, 2005.

[2.37] AIVC, IEA Annex IX. Minimum Ventilation Rates and Measures for Controlling Indoor Air Quality, Technical Note 26, Annex 5-AIVC, IEA-ECBCS, 1989.

[2.38] Avgelis, A.; Papadopoulos, A., Indoor Air quality Guidelines and Standards - A State of the Art Review, International Journal of Ventilation, Vol. 3, 2004, p. 267-278.

[2.39] Tip-vent, Towards Improved Performances of Mechanical Ventilation Systems, Tip-vent Source Book, EU programme: Non Nuclear Energy Programme Joule IV, 2001.

[2.40] Bluyssen, P. *et al*, European Indoor Air Quality Audit Project in 56 Office Buildings, Indoor Air, Vol. 6, 1996, p. 221-238.

[2.41] Concannon, P., Residential Ventilation, Technical Note 57, Annex 5-AIVC, IEA-ECBCS, 2002.

[2.42] ASHRAE, Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Low-Rise Residential Buildings, Ansi/Ashrae Standard 62.2-2007, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA, 2007.

[2.43] Sherman, M., Efficacy of Intermittent Ventilation for Providing Acceptable Indoor Air Quality, Technical Note 60, Annex 5-AIVC, IEA-ECBCS, 2006.

[2.44] Matias, L., Conforto Térmico em Ambientes Interiores, Seminário Ambiente em Edifícios Urbanos, Lisboa, 2000.

[2.45] Silva, M., Folhas de Cálculo para Determinação dos Índices de Conforto Térmico PMV e PPD, Climamed Congress, Lyon France, 2006.

[2.46] ISO, Ergonomics of the Thermal Environment. Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria, ISO 7730, International Organization for Standardization, Geneva, 2005.

[2.47] Matias, L., Avaliação das Condições Ambientais de um Apartamento em Matosinhos em Situação de Utilização Corrente. Inverno de 2003, LNEC, NRI, Relatório 301/03, 2003.

[2.48] CEN, Ventilation for non-Residential Buildings. Performance Requirements for Ventilation and room-Conditioning Systems, EN 13 779, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2007.

[2.49] Brager, G.; Dear, R., Thermal Adaptation in the Built Environment: a Literature Review, Energy and Buildings, Vol. 27, 1998, p. 83-96.

[2.50] Santamouris, M., Adaptive Thermal Comfort and Ventilation, VIP Nº 12, Annex 5-AIVC, IEA-ECBCS, 2006.

[2.51] Dear, R.; Brager, G., Thermal Comfort in Naturally Ventilated Buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55, Energy and Buildings, Vol. 34, 2002, p. 549-561.

3. MODELAÇÃO DA VENTILAÇÃO EM EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO

3.1. MECANISMOS DA VENTILAÇÃO NATURAL

A renovação do ar interior de um edifício por ar exterior dá-se como resultado da diferença de pressão entre o interior e o exterior, provocando escoamentos em todos os pontos da envolvente em que há aberturas ou frinchas que permitem a passagem do ar. No caso da renovação do ar resultar da existência de aberturas (fixas ou móveis) voluntariamente criadas na envolvente, o processo designa-se por Ventilação Natural, Mecânica ou Híbrida, enquanto que, quando resulta da existência involuntária e não controlável, mas sempre inevitável, de frinchas/fendas, o processo designa-se por Infiltração (ou Exfiltração).

3.1.1. O EFEITO DE CHAMINÉ

Quando o ar no interior do edifício está a uma temperatura distinta da do ar exterior, a correspondente diferença de massas volúmicas resulta numa diferença de pressão estática (Δp [Pa]) entre o interior e o exterior do edifício - efeito de chaminé ou impulsão térmica - traduzida por [3.1]:

$$\Delta p = \Delta \rho g h \tag{3.1}$$

em que:

- $\Delta \rho$: diferença de massas volúmicas [kg/m^3];
- g: aceleração da gravidade [m/s^2];

- h: distância ao nível neutro - nível em que as pressões interior e exterior são iguais [m].

sendo:

$$\Delta\rho = \rho_e \beta \Delta T_{\text{int-ext}} \tag{3.2}$$

em que:

- ρ_e: massa volúmica do ar exterior [kg/m^3][1];
- β: coeficiente de expansão volumétrico [K^{-1}][2];
- $\Delta T_{\text{int-ext}}$: diferença de temperatura média entre o interior e o exterior [K].

Assim:

$$\Delta\rho = \frac{p_e}{RT_e}\frac{1}{T_i}(T_\text{i} - T_\text{e}) = \frac{p_e}{R}\left(\frac{1}{T_\text{e}} - \frac{1}{T_\text{i}}\right) \tag{3.3}$$

Então, a diferença de pressões interior-exterior resultante do efeito de chaminé é:

$$\Delta p = \frac{p_\text{e} g h}{R}\left(\frac{1}{T_\text{e}} - \frac{1}{T_\text{i}}\right) \tag{3.4}$$

ou substituindo os valores das propriedades do ar à pressão atmosférica normal, da pressão atmosférica e da aceleração da gravidade:

[1] A massa volúmica do ar exterior, ρ_e, é obtida através da equação dos gases perfeitos, $p_e = \rho_e R T_e$ ou $\rho_e = \frac{p_e}{RT_e}$; ($p_e$ = pressão exterior [Pa]).

[2] Para um gás perfeito à temperatura interior do edifício, $\beta = \frac{1}{T_\text{i}}$.

$$\Delta p \approx 3450h\left(\frac{1}{T_{\mathrm{e}}}-\frac{1}{T_{\mathrm{i}}}\right) \tag{3.5}$$

A expressão anterior é válida para 7ºC < $\overline{T}$ < 17ºC e 8ºC < $\Delta T_{\text{int-ext}}$ < 23ºC [3.1].

A distribuição de pressões na envolvente do edifício é do tipo ilustrado na Figura 3.1, em que se admite que a temperatura interior é mais elevada que a exterior. Neste caso, verifica-se que há uma tendência para a entrada de ar exterior frio nos níveis inferiores do edifício. Este ar é aquecido no interior, "fica mais leve", e tende a subir e a sair do edifício pelos níveis mais elevados. No caso da temperatura interior ser inferior à atmosférica, o sentido de deslocação do ar interior inverte-se relativamente ao caso ilustrado na Figura 3.1.

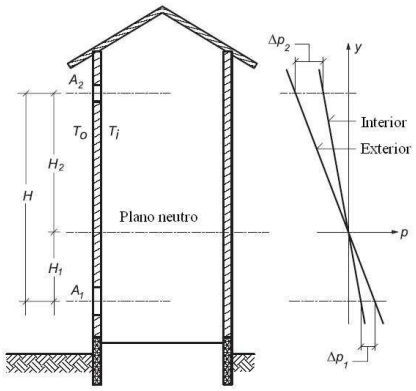


Figura 3.1 - Diferença de pressões resultante do efeito de chaminé (adaptado de [3.2]).

Uma vez que o efeito de chaminé é devido a uma diferença de massa volúmica entre o ar interior e o exterior e uma vez que esta varia, essencialmente, com a temperatura e a humidade, alguns modelos utilizam a seguinte equação para obter a massa volúmica do ar [3.3]:

$$\rho = \frac{p}{461{,}518(T + 273{,}15)(U + 0{,}62198)}(1+U) \tag{3.6}$$

em que:

- p: pressão [Pa];
- T: temperatura [ºC];
- U: teor de humidade do ar [kg/kg].

É necessário ter alguns cuidados com a obtenção de dados relativos à temperatura ambiente, nomeadamente quando se utilizam dados provenientes de estações meteorológicas situadas em zonas rurais ou semi-rurais. Estas podem registar temperaturas mais baixas que as urbanas, devido ao fenómeno designado por "ilha de calor" (Figura 3.2). Também devido ao mesmo fenómeno, e em condições de vento fraco, pode haver um aumento da velocidade do vento em meio urbano [3.4].

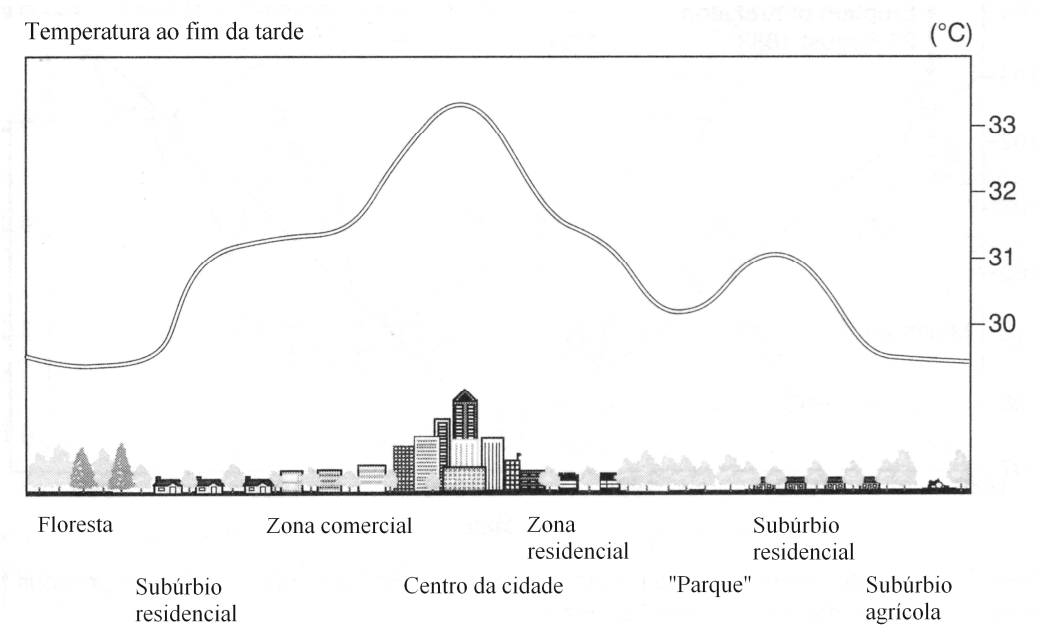


Figura 3.2 - Representação da diferença de temperatura entre áreas diferentes (adaptado de [3.5]).

3.1.2. O VENTO

O vento dá origem a um escoamento de ar à volta de um edifício que gera na envolvente pressões estáticas superiores ou inferiores à pressão atmosférica. As primeiras ocorrem sobretudo nas zonas da envolvente expostas directamente à incidência do vento (barlavento), enquanto que as últimas predominam nas zonas da envolvente do lado oposto ao da direcção do vento (sotavento). Nas coberturas, as pressões e depressões dependem da inclinação das águas. Assim, por acção do vento, resultam distribuições de pressão dos tipos que se ilustra na Figura 3.3.

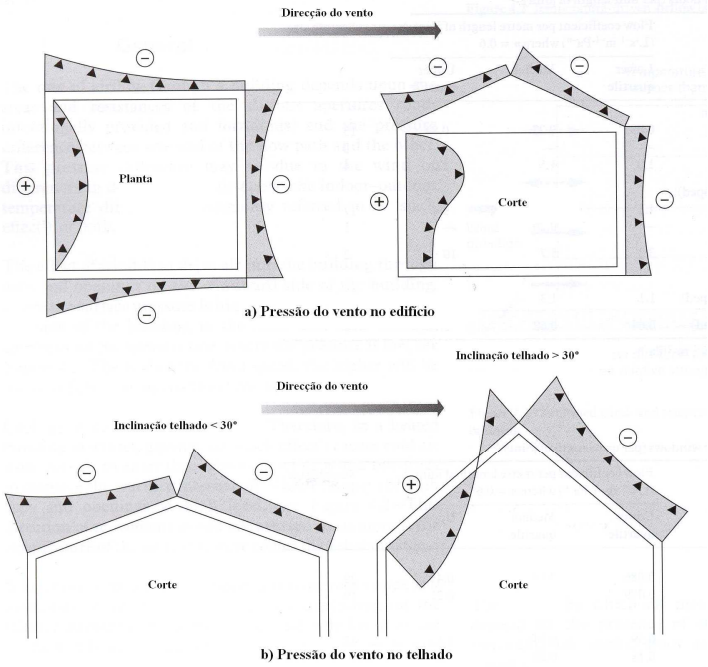


Figura 3.3 - Distribuições de pressão resultante da acção do vento (adaptado de [3.6]).

Deve notar-se que a velocidade do vento incidente é normalmente de caracterização difícil. Por um lado, tratando-se de um escoamento fortemente turbulento, ela varia continuamente (em situações correntes usa-se a velocidade média). Por outro lado, os efeitos da Camada Limite Atmosférica (CLA) que, com a aproximação ao solo, faz reduzir a velocidade do ar desde a zona não perturbada do escoamento até valores quase nulos junto ao solo e ainda particularidades geométricas dos edifícios e dos obstáculos vizinhos (outros edifícios, orografia, local, vegetação, etc.) tornam a caracterização e previsão da velocidade do vento

incidente num dado ponto da envolvente um dos aspectos de mais difícil estudo no domínio da ventilação natural.

Caracterizações particulares de um edifício são possíveis mediante estudos experimentais em túnel de vento com modelos em escala reduzida. Nestes, é possível medir os denominados coeficientes de pressão, C_p, que, para cada ponto da envolvente, permitem o cálculo da pressão local (p_v), em função da pressão dinâmica do escoamento não perturbado.

$$p_v = C_p \frac{1}{2} \rho_e \overline{U_{ref}^2} \tag{3.7}$$

com:

$$C_p = \frac{p_i - p_\infty}{\rho_e \frac{1}{2} \overline{U}_{ref}^2} \tag{3.8}$$

em que:

- C_p: coeficiente de pressão no local i [-];
- p_i: pressão estática local [Pa];
- p_∞: pressão estática de referência, pressão atmosférica [Pa];
- $\overline{U_{ref}}$: velocidade média do vento não perturbada pelo edifício a uma altura de referência, normalmente referida à cota da cobertura [m/s].

Os coeficientes de pressão variam com a incidência (direcção + orientação) do vento, a topografia, a rugosidade do terreno e os obstáculos vizinhos. Só é possível obter coeficientes de pressão para velocidades do vento superiores a 3-4 m/s [3.7]. A sua obtenção é dispendiosa, recorrendo-se normalmente a ensaios em túnel de vento ou modelos numéricos do tipo CFD [3.8] (ver §3.4.5), só se justificando em edifícios muito especiais ou em investigação [3.9], [3.10], [3.11]. Para os casos correntes, os coeficientes

de pressão poderão ser retirados de bibliografia especializada [3.4] ou das disposições regulamentares relativas a acções para estruturas de edifícios (RSA: DL 253/83, de 31 de Maio [3.12]).

O tipo de bibliografia anterior fornece-nos um valor único do coeficiente de pressão para a superfície total de uma fachada (ou cobertura). No entanto, para efeitos de estudos de ventilação é conveniente conhecer os valores para um local exacto, janela, grelha de entrada de ar, etc.. Assim, desenvolveu-se um modelo paramétrico resultante de estudos de túnel de vento [3.13] (*Cpcalc+*: disponível em http://groups.yahoo.com/group/comis/files) que permite calcular o coeficiente de pressão para um local pré-definido da envolvente e para qualquer direcção do vento. No entanto, o modelo tem restrições de aplicação derivadas dos limites de variação dos parâmetros utilizados. O modelo não pode ser aplicado quando [3.14]:

- o edifício está instalado em terreno com elevada rugosidade (não aplicável em centros urbanos) e/ou alta densidade de construção na imediação do edifício;
- os edifícios contíguos têm padrão disperso ou irregular;
- o edifício tem uma altura superior a 4 vezes os edifícios contíguos ou metade da altura dos edifícios contíguos;
- o edifício tem forma irregular;
- o edifício tem um rácio entre o comprimento e a altura menor que 0,5 ou maior que 4.

O modelo de previsão *Cpgenerator* (disponível em http://cpgen.bouw.tno.nl) tenta ultrapassar as limitações do modelo anterior. Aplica-se a toda a gama de rugosidades do terreno e não tem restrições relativamente às dimensões do edifício analisado ou dos edifícios vizinhos. Partindo de uma forma acessível de introduzir as dimensões/orientação do edifício e obstruções vizinhas, este permite o cálculo automático dos coeficientes de pressão em fachadas e coberturas de edifícios com forma paralelepipédica [3.15].

Estudos obtidos por túnel de vento e simulação numérica [3.16], [3.17], demonstraram que os coeficientes de pressão obtidos para objectos sólidos (estudos mais correntes) são

diferentes dos coeficientes obtidos para os mesmos objectos, mas providos de aberturas (objectos porosos). Mais especificamente, demonstraram que os coeficientes de pressão são dependentes do tamanho e localização da abertura.

O registo da variação do vento em função do tempo mostra que o vento é um fenómeno físico muito irregular. Este comportamento aleatório é designado por turbulência. Nas camadas inferiores da atmosfera, a turbulência é gerada por qualquer obstáculo do terreno, bem como pela instabilidade térmica do escoamento (só para velocidades baixas). A turbulência decresce com o aumento da altura [3.18].

A influência da turbulência nas renovações horárias ainda é um assunto muito pouco estudado [3.19]. A subestimação das renovações horárias, devida à não consideração da turbulência do vento, é da ordem dos 10 a 20% [3.20]. No entanto, em estudo recente, demonstrou-se que a turbulência, em situações correntes, não influencia os caudais médios de ventilação natural [3.1]. Acresce também que flutuações com frequência superior a 1 Hz não induzem caudais de infiltração [3.1].

Para o cálculo da velocidade média do vento em situações de ventilação natural, torna-se conveniente tomar esta como a média das velocidades obtidas em registos com durações compreendidas entre 10 minutos a uma hora [3.11].

A camada limite atmosférica

A camada limite atmosférica desenvolve-se desde o solo (velocidade horizontal nula) até uma altura em que se deixam de sentir os efeitos dos obstáculos existentes neste, variando progressivamente entre os dois pontos. A espessura da camada limite, δ, varia entre os 250 m e os 600 m, dependendo da natureza da superfície onde se desenvolve o escoamento [3.21].

A experimentação sobre escoamentos de camada limite, quer na atmosfera quer no ambiente controlado dos túneis de vento, permitiu obter uma descrição matemática simplificada do perfil de velocidades sob a forma de uma lei de potência [3.11].

$$\overline{U}_z = \overline{U}_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^{\alpha} \tag{3.9}$$

em que:

- $\overline{U}_z$: velocidade média à cota z [m/s];
- $\overline{U}_{ref}$: velocidade média de referência medida à cota z_{ref} [m/s];
- α: expoente que caracteriza a rugosidade do terreno [-].

Na Figura 3.4 apresentam-se, esquematicamente, os perfis de velocidade do tipo potência, para três tipos diferentes de rugosidade do terreno.

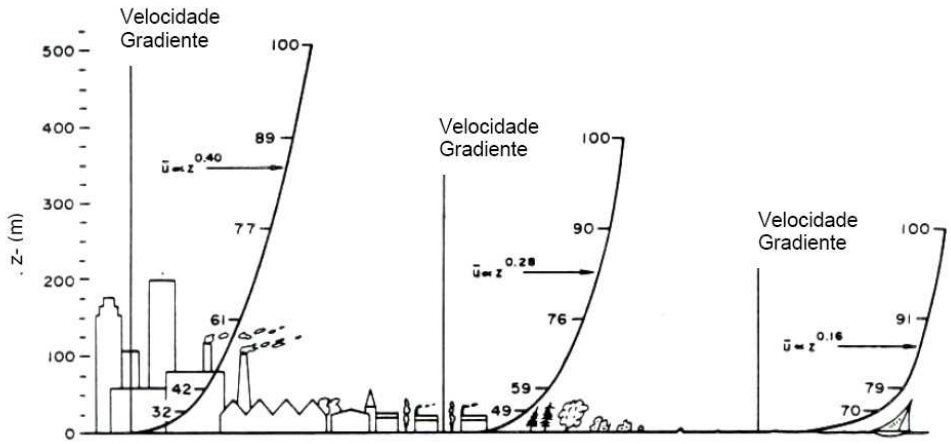


Figura 3.4 - Influência da rugosidade do terreno nos perfis do tipo potência da velocidade do vento [3.11].

A velocidade gradiente representada na figura anterior é gerada pelas diferenças de pressão, resultado directo dos diferenciais de aquecimento solar sobre o globo [3.1].

No Quadro 3.1 apresentam-se os valores da espessura da camada limite e o expoente do perfil do tipo potência.

Quadro 3.1 - Valores da espessura da camada limite e expoente do perfil do tipo potência (adaptado de [3.11]).

Tipo de superfície	Espessura da camada limite δ [m]	Expoente do perfil α [-]
Oceano	250	0,12
Zona rural com vegetação rasteira	300	0,16
Zona Suburbana, floresta	400	0,28
Zona com edifícios de grande porte	500	0,40

Historicamente, o perfil do tipo potência foi o primeiro a ser utilizado para representar a variação de velocidades médias em terrenos homogéneos, dada a simplicidade que lhe está inerente (é uma lei empírica [3.7]). No entanto, esta lei de variação apresenta algumas desvantagens, sendo a principal o facto de este tipo de perfil se ajustar bem na zona exterior da CLA, mas não na zona superficial, que corresponde à zona junto aos edifícios, constituindo este desajuste a principal desvantagem do perfil do tipo de potência face ao logarítmico.

A variação em altura da velocidade média do vento junto à superfície ($20Z_0 \leq z \leq 0{,}1\delta$ [3.11], [3.22]) pode ser descrita pela seguinte lei logarítmica [3.11]:

$$\overline{U}_z = \overline{U}_{ref} \frac{\ln\left(\frac{z}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{Z_0}\right)} \tag{3.10}$$

em que:

- $\overline{U}_z$: velocidade média à cota z [m/s];
- Z_0: escala de rugosidade [cm][3].

Os valores da escala de rugosidade, Z_0, resumem-se no Quadro 3.2.

[3] Z_0 caracteriza a rugosidade do terreno (dimensão e espaçamentos médios das rugosidades do terreno).

Quadro 3.2 - Valores da escala de rugosidade, Z_0, referentes a diferentes tipos de terreno [3.11].

Tipo de terreno	Z_0 [cm]
Areia	0,01 - 0,1
Superfície coberta com neve	0,1 - 0,6
Relva aparada (≈ 0,01 m)	0,1 - 1
Vegetação rasteira, estepe	1 - 4
Terreno de pousio, não cultivado	2 - 3
Vegetação alta	4 - 10
Palmeiras	10 - 30
Pinheiros	90 - 100
Subúrbios com baixa densidade de edifícios (com d = 0 m)	20 - 40
Subúrbios com alta densidade de edifícios; cidades (com d = 0 m)	80 - 120
Centros das grandes cidades (com d = 0 m)	200 - 300

No quadro anterior, o parâmetro d pretende representar o deslocamento do plano de referência em zonas com grande densidade urbana. Sendo assim, nestas zonas, o plano de origem será $z = z_{solo} - d$, com d igual a aproximadamente 70% da altura média dos edifícios ($d \approx 0{,}70 h_{média}$) [3.1]. Abaixo de d, face à dificuldade de caracterização da velocidade do vento, pode considerar-se esta como constante [3.21].

Quando não existe possibilidade de obter a velocidade do vento num determinado local, é conveniente recorrer a valores registados em estações meteorológicas, obtidos fora da zona em estudo, Figura 3.5.

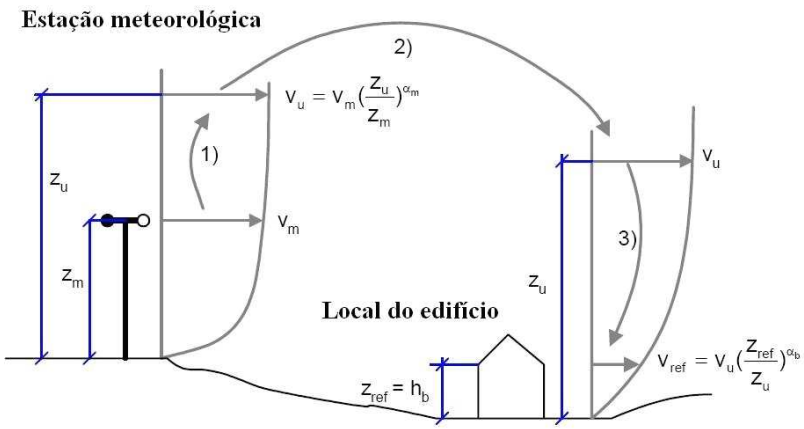


Figura 3.5 - Transposição da velocidade obtida em estações meteorológicas para o local em estudo (adaptado de [3.23]).

Há, portanto, que transferir os valores registados para o local em estudo, através da equação [3.24]:

$$\overline{U}_1 = \overline{U}_{\text{ref}} \frac{\left(\dfrac{z_1}{\delta_1}\right)^{\alpha_1}}{\left(\dfrac{z_{\text{ref}}}{\delta_{\text{ref}}}\right)^{\alpha_{\text{ref}}}} \tag{3.11}$$

onde os índices *ref* e *1* se referem, respectivamente, às características do local da estação meteorológica e às do local em estudo (pode-se utilizar o mesmo raciocínio para a lei logarítmica [3.18]).

A equação (3.11) pode ser aplicada quando o terreno é aproximadamente plano (não é o caso da transposição entre um local rural e uma zona urbana), sem colinas ou montanhas entre os dois locais, e quando o local onde se pretende obter a velocidade não é muito longe do local da estação meteorológica, caso contrário, devem ser aplicados outros métodos [3.23].

Como não se dispõe até ao momento de nenhum modelo para a direcção do vento, assume-se, normalmente, que a direcção do vento é a mesma que a da estação meteorológica (hipótese mais verosímil para terreno plano), sendo esta considerada horizontal para velocidades superiores a 3-4 m/s (sem influência térmica) [3.7].

Para velocidades do vento baixas (< 4 m/s), a velocidade no interior de um canyon (altura edifícios / largura rua < 0,7) não se relaciona com aquela, sendo influenciada pela acção térmica, neste caso, já existem modelos para prever a velocidade no interior da malha urbana [3.25].

A escolha da velocidade de referência deverá ser feita de acordo com a variação sazonal própria da zona e, se possível, tendo em conta a probabilidade de ocorrência, obtida a partir de uma análise estatística dos valores registados [3.1], [3.21]. Para efeitos de ventilação natural, pode considerar-se a velocidade média do vento que é excedida em 50% do tempo [3.26].

3.2. ESCOAMENTO POR ABERTURAS

O caudal de infiltrações ou de ventilação natural, $q_{\inf}$, pode, em teoria, ser calculado, se forem conhecidos todos os percursos possíveis de passagem de ar de ou para o interior, contabilizando as contribuições individuais de cada passagem. Dependendo do tipo de abertura, podemos ter [3.14], [3.18], [3.27]:

- frinchas ou fendas (dimensões típicas menores que 10 mm);
- grandes aberturas (dimensões típicas maiores que 10 mm).

Para frinchas, o caudal pode ser dado pela expressão (“*lei de potência*”):

$$q_{\inf} = CA\Delta p^{n} \tag{3.12}$$

em que:

- $q_{\inf}$: caudal volúmico [m^3/s];
- C: coeficiente de escoamento, varia em função da geometria [$m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot Pa^{-n}$];
- A: área da abertura ou frincha [m^2];
- Δp: diferença de pressão através da abertura [Pa];
- n: expoente de escoamento[4] [-];

Os valores de C e n são obtidos experimentalmente e encontram-se tabelados para vários tipos de situações [3.4]. Uma vez que o caudal que atravessa uma fenda/frincha também depende da temperatura, no documento [3.3] apresentam-se expressões para a correcção da permeabilidade, em função da temperatura, de frinchas/fendas, janelas (simples ou duplas), portas e paredes.

[4] Caracteriza o regime do escoamento, varia entre 0,5 para escoamento turbulento e 1,0 para escoamento laminar. Para frinchas (comprimento >> espessura) o escoamento está mais próximo do laminar, verificando-se que $n \approx 0{,}67$. Para grandes aberturas (comprimento << espessura), o escoamento está mais próximo do turbulento, $n \approx 0{,}5$ [3.20].

Outra forma de estabelecer a relação entre a diferença de pressão e o caudal volúmico é através de uma relação quadrática, dimensionalmente homogénea, ao contrário da anterior [3.28]. Dada por:

$$\Delta p = \alpha q + \beta q^2 \tag{3.13}$$

onde Δp e q são as variáveis definidas anteriormente e α e β são constantes.

Para grandes aberturas é frequentemente usada a seguinte expressão, denominada *equação do escoamento por um orifício*, derivada da equação de Bernoulli ($p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h$ = cte):

$$q = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\overline{\rho}}} \tag{3.14}$$

em que:

- q: caudal volúmico [m^3/s];
- C_d: coeficiente de descarga [-][5];
- A: área da abertura perpendicular ao escoamento [m^2];
- $\overline{\rho}$: massa volúmica média na direcção do escoamento [kg/m^3];
- Δp: diferença de pressão estática através da abertura [Pa].

A medição da área da abertura requer exactidão, de modo a reduzir a incerteza nos resultados obtidos [3.29], [3.30], nomeadamente, em janelas do tipo oscilo-batente.

De acordo com [3.1], [3.14], [3.18], [3.31], o coeficiente C_d pode variar em função de diversos factores, tais como:

- número de Reynolds;

[5] $C_d = \frac{1}{\sqrt{\zeta}}$, sendo ζ o coeficiente de perda de carga.

- configuração (forma e localização da abertura na fachada);
- ângulo de incidência do escoamento;
- diferença de temperatura entre os dois lados da abertura;
- porosidade (relação entre a área da abertura e a área da fachada).

Em face do exposto, torna-se evidente a necessidade de adoptar um valor apropriado a cada situação, o que contraria claramente a prática corrente de assumir um valor próximo de 0,60, independentemente da situação [3.1]. Recentemente, tentou-se uma nova abordagem, através do cálculo de C_d pelo método denominado *Stream Tube* (volume que contém o fluido que atravessa a abertura), o que levou a concluir que o valor deste parâmetro obtido pelo método tradicional (*Chamber Method*) é inferior ao real [3.17], [3.32]. Acresce o facto de que, a equação (3.14) sofre de algumas inconsistências: despreza a energia cinética do fluído no interior das zonas; quando aplicada em ventilação cruzada, não se podem usar os coeficientes de pressão obtidos em objectos sólidos; só pode ser aplicada se a porosidade for menor que 30-35% [3.16].

3.3. EFEITOS COMBINADOS

Num caso real, os dois mecanismos anteriormente descritos coexistem, pelo que a distribuição de pressões que actua na envolvente de um edifício é obtida pela soma dos valores instantâneos das pressões geradas por cada um desses mecanismos. Podem acontecer casos particulares de mais difícil análise, como, por exemplo, quando as pressões de cada um dos mecanismos se anulam e originam inversões de fluxo. Como a distribuição resultante da acção do vento é fortemente variável, também a distribuição global o é, mas, em termos médios ou instantâneos, é possível combinar o que se representou nas Figura 3.1 e Figura 3.3, para obter a distribuição típica num edifício, tal como se representa na Figura 3.6.

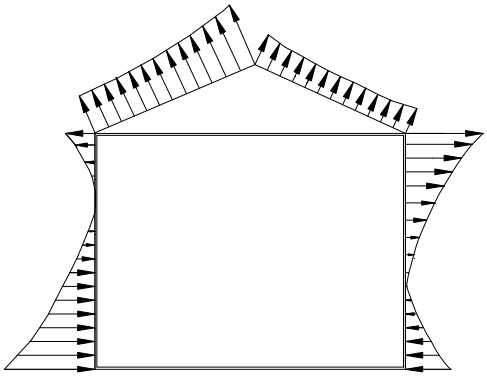


Figura 3.6 - Distribuição global de pressões como resultado da acção combinada do vento e do efeito de chaminé.

É importante compreender que, dado que é a diferença de pressões o mecanismo responsável pelo movimento do ar, não é correcto determinar os caudais resultantes de cada um dos mecanismos isoladamente, somando-os de seguida. O processo correcto é o que foi descrito no parágrafo anterior, isto é, somar os Δp e determinar o caudal que resulta desse Δp conjunto. Em alternativa, pode calcular-se o caudal de infiltrações devido exclusivamente a cada um dos mecanismos (vento e feito de chaminé) e, face às equações apresentadas no §3.2, obtém-se:

$$q_{\inf} = (q_{\mathrm{ec}}^{1/n} + q_{\mathrm{v}}^{1/n})^n \tag{3.15}$$

em que:

- $q_{\inf}$: caudal total de infiltrações devido ao efeito combinado [m^3/s];
- q_{ec}: caudal devido ao efeito de chaminé [m^3/s];
- q_{v}: caudal devido ao vento [m^3/s];
- n: expoente apresentado no §3.2.

É habitual tomar-se n = 0,5, pelo que [3.24]:

$$q_{\text{inf}} = \sqrt{q_{\text{ec}}^2 + q_{\text{v}}^2} \tag{3.16}$$

O RCCTE (DL 80/06, de 4 de Abril [3.33]) apresenta uma metodologia que permite adicionar o caudal resultante da equação anterior e o caudal proveniente de um sistema de ventilação mecânico, equilibrado (caudal de insuflação igual ao caudal de extracção) ou não equilibrado.

Recentemente, foram apresentadas soluções analíticas para o caso de uma zona com duas aberturas, com efeito de chaminé e ventilador de exaustão ou insuflação. Concluiu-se que a adição linear de pressões, entre ventiladores mecânicos e efeito de chaminé, só é válida quando o ventilador mecânico é dominante [3.34]. Sendo assim, a equação (3.16) tem aplicabilidade limitada, particularmente, não se aplica quando os efeitos da acção térmica e do vento são opostos [3.1].

3.4. MODELOS PREDITIVOS

3.4.1. ENQUADRAMENTO

O conhecimento das características específicas do escoamento de ar num espaço, bem como as renovações horárias em edifícios, é necessário por razões de conforto e energia. Os arquitectos desejam conhecer o escoamento de ar através de grandes aberturas, para as dimensionar apropriadamente, enquanto que os engenheiros estão interessados na distribuição da velocidade, numa zona, para dimensionar as aberturas de entrada e saída de ar. Os peritos em conforto desejam saber os valores da velocidade do ar numa zona, para calcular as trocas de calor de convecção com o corpo humano, enquanto que os técnicos da qualidade do ar estão interessados na taxa de ventilação, na dispersão dos contaminantes e na eficiência da ventilação.

Os processos físicos envolvidos na ventilação são complexos, nomeadamente na ventilação natural, e a interpretação do seu papel na eficiência da ventilação é uma tarefa difícil [3.18].

A mecânica de fluidos clássica tem descrito o fenómeno do fluxo de ar, sob condições de fronteira bem definidas, de uma maneira satisfatória. A descrição do fenómeno é conseguida, resolvendo as bem conhecidas equações de Navier-Stokes, combinadas com equações que descrevem os efeitos de turbulência, sob condições de fronteira específicas e condições iniciais. Contudo, tendo em atenção o carácter aleatório das características do vento, um conhecimento profundo das condições de fronteira e iniciais é quase impossível.

De acordo com o tipo de informação requerida, vários modelos e ferramentas podem ser usados. Os modelos variam de algoritmos empíricos simples para calcular a taxa de ventilação global, até técnicas sofisticadas de mecânica de fluidos computacional que resolvem as equações de Navier-Stokes. Genericamente, baseado no nível de complexidade do modelo, quatro aproximações diferentes podem ser distinguidas para a descrição dos fluxos de ar para o caso da ventilação em edifícios:

- modelos empíricos (*empirical models*);
- modelos multi-zona (*multizone models*);
- modelos zonais (*zonal models*);
- modelos CFD (*Computational Fluid Dynamics models*).

3.4.2. MODELOS EMPÍRICOS

Modelos empíricos simplificados oferecem, geralmente, correlações para calcular a taxa de ventilação ou a velocidade média numa zona. Combinam o efeito da diferença de temperatura com a velocidade do vento e um eventual termo de “flutuação”, no sentido de avaliar a taxa de ventilação ou a velocidade do ar, no interior de um edifício. Estas ferramentas são úteis porque oferecem uma primeira e rápida estimativa das renovações horárias ou da velocidade média, mas devem sempre ser usadas dentro dos limites da sua

aplicabilidade. Apresentam-se nesta tese somente os métodos empíricos para prever as renovações horárias.

As metodologias a seguir descritas foram deduzidas, quer da teoria, quer de resultados experimentais específicos, e não podem ser consideradas de validade geral, mas sim, dentro do seu limite de validade. Estes modelos podem ser usados na fase de concepção para obter uma aproximação do valor das renovações horárias.

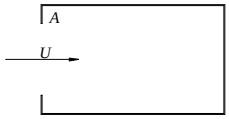
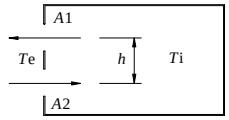
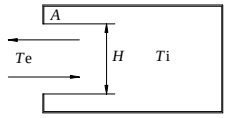
Os modelos empíricos podem ser separados em dois grupos [3.20]:

- modelos puramente empíricos, que resultam somente de medições;
- modelos semi-empíricos, que fazem tentativas para simular os processos físicos e usualmente resolvem a equação de continuidade.

3.4.2.1.O modelo da BS 5925

O modelo da norma BS 5925: 1991 [3.27] propõe fórmulas para o cálculo da infiltração e ventilação em espaços com uma só fachada (*single-sided*) ou com ventilação cruzada (*cross-ventilation*). O método assume escoamento bidireccional através do espaço e ignora partições internas. O Quadro 3.3 e o Quadro 3.4 apresentam as fórmulas propostas para diferentes padrões de fluxo e para condições diferentes.

Quadro 3.3 - Fórmulas para ventilação com uma só fachada (adaptado de [3.27]).

Condições	Representação esquemática	Fórmula
a) Ventilação devida ao vento:		$q = 0{,}025 A U_{\mathrm{ref}}$ [m^3/s], em que: - A = área da abertura [m^2]; - U_{ref} = velocidade do vento [m/s].
b) Ventilação devida à diferença de temperatura, com duas aberturas:		$q = C_d A \left[\frac{\varepsilon (2)^{0,5}}{(1+\varepsilon)(1+\varepsilon^2)^{0,5}} \right] \left(\frac{\Delta T_{\mathrm{int-ext}} g h}{\overline{T}} \right)^{0,5}$, em que: - C_d = coeficiente de descarga [-]; - $A = A_1 + A_2$; - $\varepsilon = A_1 / A_2$; - $\overline{T} = \frac{T_{\mathrm{e}} + T_{\mathrm{i}}}{2}$ [K].
c) Ventilação devida à diferença de temperatura, com uma abertura:		$q = C_d \frac{A}{3} J(\phi) \left(\frac{\Delta T_{\mathrm{int-ext}} g H}{\overline{T}} \right)^{0,5}$

O valor de $J(\phi)$, respeitante à formulação do tipo c) do Quadro 3.3, é obtido na Figura 3.7.

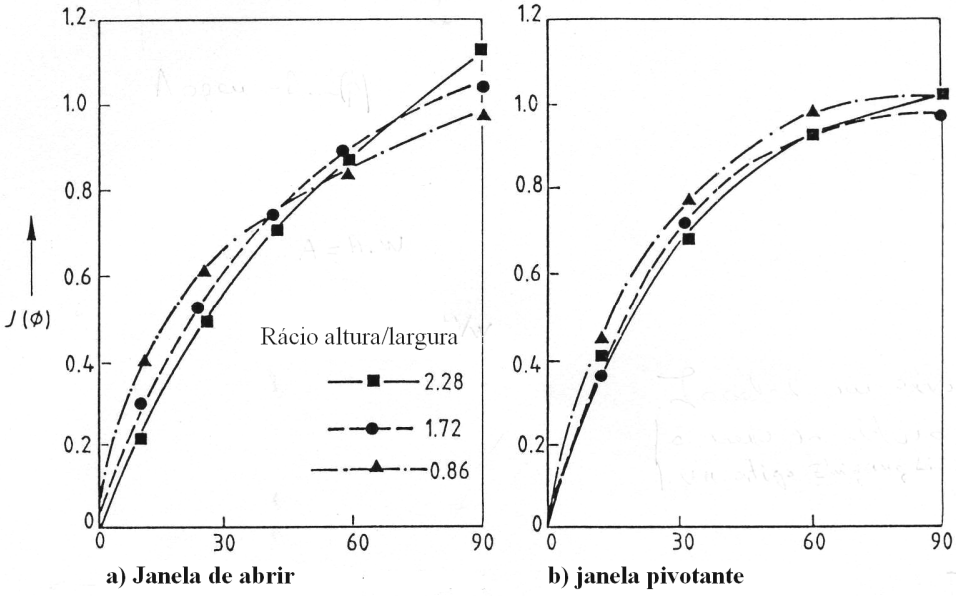
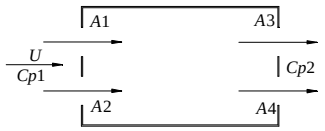
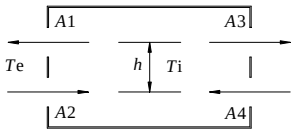
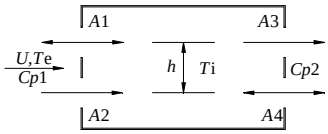


Figura 3.7 - Variação de $J(\phi)$ com o ângulo de abertura ϕ, a) janela de abrir, b) janela pivotante (adaptado de [3.27]).

Quadro 3.4 - Fórmulas para ventilação cruzada (adaptado de [3.27]).

Condições	Representação esquemática	Fórmula
a) ventilação devida só ao vento:		$q_v = C_d A_v U_{ref} (\Delta C_p)^{0,5}$, em que: $-\frac{1}{A_v^2} = \frac{1}{(A_1 + A_2)^2} + \frac{1}{(A_3 + A_4)^2}$
b) ventilação devida só à diferença de temperatura:		$q_{ec} = C_d A_{ec} \left(\frac{2\Delta T_{int\text{-}ext}\, gh}{\overline{T}} \right)^{0,5}$, em que: $-\frac{1}{A_{ec}^2} = \frac{1}{(A_1 + A_3)^2} + \frac{1}{(A_2 + A_4)^2}$
c) ventilação devida ao vento e à diferença de temperatura: (Corrigido de acordo com [3.6])		$q = q_{ec}$ para $\frac{U}{(\Delta T_{int\text{-}ext})^{0,5}} < 0{,}26 \frac{A_{ec}}{A_v} \left(\frac{h}{\Delta C_p} \right)^{0,5}$, $q = q_v$ para $\frac{U}{(\Delta T_{int\text{-}ext})^{0,5}} > 0{,}26 \frac{A_{ec}}{A_v} \left(\frac{h}{\Delta C_p} \right)^{0,5}$

3.4.2.2. O modelo de Aynsley

Assumindo duas aberturas principais em duas fachadas opostas de um edifício, este modelo usa a definição de coeficientes de pressão, C_{p1} e C_{p2}, em cada fachada, para calcular o caudal de ar através do edifício. Impondo a conservação da massa entre as duas aberturas, a seguinte expressão é derivada para o caudal global devido à acção do vento [3.18]:

$$q = \sqrt{\frac{C_{p1} + C_{p2}}{\frac{1}{A_1^2 C_{d1}^2} + \frac{1}{A_2^2 C_{d2}^2}}}\, U_{ref} \qquad [\mathrm{m^3/s}] \tag{3.17}$$

onde C_{d1} e C_{d2} são coeficientes de descarga para as configurações das aberturas, A_1 e A_2 [m^2] e U_{ref} a velocidade de referência do vento [m/s].

3.4.2.3. O modelo de De Gidds e Phaff

Resultados experimentais têm mostrado que os efeitos de flutuação são responsáveis pelo caudal no caso de ventilação com uma só fachada ou quando o vento é paralelo a aberturas em duas fachadas paralelas. Fluxos de flutuação são atribuídos às características de turbulência do vento e ou à turbulência induzida pelo próprio edifício. A turbulência do escoamento ao longo de uma abertura causa simultaneamente flutuações positivas e negativas de pressão no ar interior. O presente modelo tenta, então, contabilizar o efeito de turbulência referido.

Para o caso de ventilação com uma só fachada, pode-se definir uma velocidade efectiva, v_{ef}, referida para o caudal através de metade da janela. De uma forma geral, a velocidade efectiva é definida por [3.14], [3.18]:

$$v_{ef} = \frac{q}{A/2} = \sqrt{\frac{2}{g}(\Delta p_v + p_{ec} + p_{turb})} \tag{3.18}$$

dando a forma de:

$$v_{ef} = \frac{q}{A/2} = \sqrt{C_1 U_{\text{met}}^2 + C_2 H \Delta T_{\text{int-ext}} + C_3} \tag{3.19}$$

onde U_{met} é a velocidade do vento medida numa estação meteorológica [m/s], $\Delta T_{\text{int-ext}}$ é a diferença de temperatura entre o interior e o exterior, [ºC] ou [K], H é a altura da abertura [m], C_1 é um coeficiente adimensional dependente do vento, C_2 é uma constante de fronteira e C_3 é uma constante de turbulência. O termo C_3 é equivalente a uma pressão efectiva de turbulência que fornece ventilação na ausência dos efeitos de chaminé ou do vento em regime permanente. Comparando valores medidos e calculados, obtiveram-se os seguintes valores: C_1 = 0,001, C_2 = 0,0035 e C_3 = 0,01.

Uma correlação empírica que integra o feito de turbulência num modelo de um modo mais genérico é apresentada em [3.35].

3.4.2.4. O modelo do LNEC

O LNEC, no primeiro trabalho produzido em Portugal sobre esta área [3.36], de que se tem conhecimento, obteve algumas expressões muito simples, deduzidas com base em algumas aproximações.

O caudal de entrada ou saída, devido ao efeito de chaminé, para duas aberturas iguais a altura diferente pode ser obtido pela expressão seguinte:

$$q = 0{,}16A\sqrt{\frac{h}{2}\Delta T_{\text{int-ext}}} \tag{3.20}$$

em que:

- q: caudal volúmico [m^3/s];
- A: área de uma abertura [m^2];
- h: distância na vertical entre as duas superfícies, medida entre pontos médios [m];
- $\Delta T_{\text{int-ext}}$: diferença de temperatura média entre o ambiente exterior e interior [ºC].

Para o cálculo do caudal, devido ao efeito de chaminé, para dois conjuntos de aberturas a altura diferente, este pode ser obtido por:

$$q = 0{,}16\sqrt{\frac{h\Delta T_{\text{int-ext}}}{\frac{1}{A_e^2}+\frac{1}{A_s^2}}} \tag{3.21}$$

em que:

- A_e: área efectiva total das aberturas de entrada [m^2];
- A_s: área efectiva total das aberturas de saída [m^2].

Para o caso do caudal, devido ao efeito do vento, para conjuntos de aberturas dispostas em série, este pode ser obtido por:

$$q = 0{,}6 A_{\mathrm{eq}} U \sqrt{C_{pe} - C_{ps}} \tag{3.22}$$

em que:

- $A_{\mathrm{eq}}^2 = \left(\Sigma \frac{1}{A_i^2} \right)^{-1}$;
- U: velocidade do vento [m/s];
- C_{pe}: coeficiente de pressão à entrada [-];
- C_{ps}: coeficiente de pressão à saída [-].

3.4.2.5. Outros modelos

Para além dos modelos descritos, pode recorrer-se a outros, tais como:

- modelos recorrendo a gráficos adimensionais. Resultam da aplicação de um modelo específico para obter um conjunto de resultados que cobrem a maior parte dos parâmetros encontrados na prática (estudos paramétricos) [3.37], [3.38];
- modelo da norma EN 13 465: 2004 [3.39], [3.40]. Esta norma usa um método aplicável a uma zona em que é necessário calcular iterativamente a pressão interna (o processo requer o recurso a computador). O método requer um conhecimento mais profundo, relativamente aos métodos apresentados anteriormente, nomeadamente, do edifício, do sistema de ventilação e dos dados climáticos;
- modelos recorrendo a soluções analíticas que resultaram do trabalho do Anexo 35 da IEA-ECBCS [3.34].

Em face da facilidade de utilização, apresenta-se no Quadro 3.5 uma comparação relativa entre os resultados de alguns modelos empíricos.

Quadro 3.5 - Comparação relativa dos resultados de alguns modelos empíricos [3.1].

Condições	Variação das estimativas	Observações	
Componente térmica - uma abertura	67% - 200%	8 K < ΔT < 24 K	Caudal para ΔT = 8 K ≈ Caudal para U = 5 m/s
Componente eólica - uma abertura	100% - (–38%)	1 < U < 5 m/s	
Componente térmica - duas aberturas	14% - 95%	8 K < ΔT < 24 K	Caudal para ΔT = 8 K ≈ Caudal para U = 1 m/s; Caudal para ΔT = 24 K ≈ metade do caudal para 5 m/s
Componente eólica - duas aberturas	100%	1 < U < 5 m/s	

Analisando o quadro anterior, retira-se que a componente eólica tem sempre de ser considerada, mesmo que o projecto de ventilação considere a componente térmica como o "motor" do processo. Esta situação corresponde, por exemplo, a um edifício com um baixo grau de permeabilidade da envolvente (nomeadamente das janelas e das portas exteriores), mas em que é sempre necessário considerar a acção eólica por via das condutas de exaustão dos gases de combustão e de ventilação (nomeadamente das instalações sanitárias) [3.1].

Assim, verifica-se que estes modelos apresentam uma grande variação de resultados, permitindo a sua utilização a obtenção grosseira dos caudais em jogo para uma zona e dados os valores das temperaturas interior e exterior e velocidade do vento.

3.4.3. MODELOS MULTI-ZONA

Os modelos empíricos são baseados em fórmulas simplificadas e têm de ser cuidadosamente aplicados dentro do seu limite de validade. Adicionalmente, devido às suas simples assunções nas quais são baseados, só podemos esperar estimativas para o caudal global para um edifício que possa ser simulado como uma zona. Contudo, em situações reais, a simulação como uma zona tem pouco significado, pois a interacção entre as várias zonas através de aberturas internas tem grande importância. Neste caso, uma análise multi-zona é necessária [3.18].

De acordo com o conceito de modelação multi-zona, um edifício é representado por uma grelha que é formada por um conjunto de nós que representam as zonas simuladas e o

ambiente exterior. A interacção entre as várias zonas é representada por “caminhos” de ligação que ligam os respectivos nós. Então, os compartimentos do edifício são representados por nós e as aberturas são representadas por caminhos de ligação do escoamento. A interacção com o ambiente exterior é representada por caminhos de ligação entre o exterior e o interior. Todos os nós, interiores e exteriores, têm uma pressão atribuída, Figura 3.8.

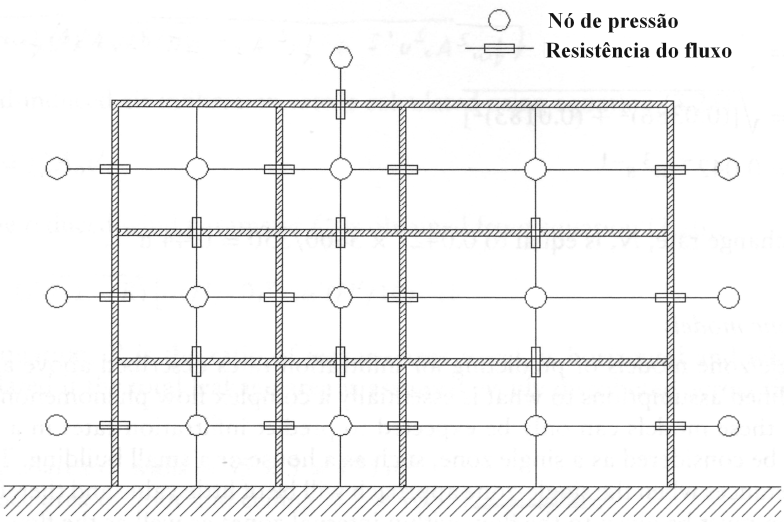


Figura 3.8 - Modelo multi-zona (adaptado de [3.26]).

As pressões nos nós exteriores são conhecidas, pelo que, de acordo com o conceito de modelação multi-zona, as pressões nos nós interiores têm que ser determinadas para se obterem os caudais.

De acordo com esta modelação, um edifício com *n* zonas é representado por uma rede de *n* nós de pressão. Alguns deles comunicam com os nós do exterior, enquanto outros só estão ligados com nós interiores. A pressão estática dos nós interiores é desconhecida. Os caminhos de ligação podem ser frinchas, janelas ou portas. O cálculo das pressões desconhecidas é obtido pela aplicação do princípio da conservação da massa em cada nó.

$$\sum_{j=1}^{n} \rho_i q_{ij} = 0 \tag{3.23}$$

onde q_{ij} é o caudal volúmico da zona *i* para a zona *j* e ρ_i é a massa volúmica na direcção do escoamento (*n* é o número de fluxos).

A aplicação do princípio da conservação da massa em cada nó interno gera um sistema de equações não lineares cuja solução fornece a respectiva pressão nos nós. Normalmente, o sistema anterior é resolvido recorrendo ao método iterativo de Newton-Raphson. De acordo com este método, é necessário, para cada pressão desconhecida, uma solução inicial. Os dados de entrada são (entre outros):

- as condições atmosféricas (temperatura e velocidade do vento);
- a temperatura interior em cada zona;
- as áreas, as cotas e os coeficientes *C* e *n* relativos à permeabilidade das pequenas aberturas;
- as dimensões, largura e altura, e cota de todas as grandes aberturas;
- o coeficiente de descarga, C_d, de todas as grandes aberturas;
- os coeficientes de pressão nas grandes aberturas exteriores;
- as dimensões (comprimento, largura e altura) e cota do pavimento de todas as zonas;

Os dados de saída são:

- as diferenças de pressão em cada abertura e/ou as pressões internas;
- os caudais em cada abertura (nos dois sentidos);
- as renovações horárias (*RPH* = caudal/volume) em todas as zonas e no edifício.

Uma pesquisa efectuada em 1989 revelou a existência de 50 modelos diferentes [3.41]. No entanto, os mais conhecidos e usados são os designados por COMIS, NATVENT, AIOLOS e CONTAMW [3.4]. O programa com mais utilizadores é provavelmente o COMIS (*Conjunction of Multizone Infiltration Specialists*) [3.42], [3.43]. Este resultou de

uma conjugação de especialistas reunidos no Anexo 23 da IEA-ECBCS e foi exaustivamente avaliado e validado [3.44], [3.45].

Apesar de apresentarem grande facilidade de manuseamento, comparativamente aos modelos do tipo zonal ou CFD (apresentados nos pontos seguintes), os modelos multi-zona têm fragilidades, que são objecto de alguma investigação, tais como [3.46]:

- soluções múltiplas. O fluxo de ar em edifícios é um fenómeno não linear e dinâmico, isto quer dizer que, para um conjunto de condições iniciais, o escoamento pode adoptar uma das várias possibilidades e, por isso, não é um fenómeno que afecte somente os modelos multi-zona. A existência de soluções múltiplas deriva da sensibilidade às condições iniciais, incluindo a "história" do escoamento (ex.: quando o vento se opõe ao efeito de chaminé podem ocorrer duas situações, consoante o efeito do vento é superior ou inferior ao efeito de chaminé - ocorrência de histerese [3.47]). Até ao momento, não existem métodos de análise que possam ser usados para identificar automaticamente este fenómeno. Sendo assim, é necessário testar todas as possibilidades para as condições iniciais;
- negligenciação da energia cinética no interior das zonas. Os modelos multi-zona são baseados na aplicação da equação de Bernoulli para determinar as diferenças de pressão entre zonas negligenciando a velocidade do escoamento no interior das zonas. Esta assunção pode introduzir erros significativos [3.48];
- não consideração da estratificação da temperatura. A maior parte dos modelos considera que a temperatura do ar em cada zona é homogénea. Esta assunção pode ignorar o plano neutro numa zona/edifício;
- dimensionamento de aberturas e condutas. De um modo genérico a maioria dos modelos multi-zona não podem ser usados explicitamente para dimensionar aberturas de ventilação, condutas, etc. Estes só podem ser usados para avaliar o resultado de uma configuração específica [3.49]. Os modelos baseados em equações do tipo *loop* (somatório da pressão num *loop* é nulo) permitem o dimensionamento dos elementos citados a partir dos caudais desejados (problema inverso ao do dos modelos multi-zona) [3.50]. De modo a facilitar o trabalho na fase de projecto, já existe software, essencialmente aplicável a edifícios comerciais, para dimensionar

aberturas/grelhas e condutas em sistemas de ventilação natural ou híbrida [3.51] (software LoopDA disponível em http://www.bfrl.nist.gov/IAQanalysis/software /index.htm). O processo não é automático, pois, o utilizador tem acesso a resultados na forma de condições limites de dimensionamento (ex.: área mínima de uma grelha) e, através da imposição de condições técnicas (ex.: dimensões comerciais de grelhas) e de outras técnicas, o projectista pode chegar a uma solução inicial;

- divergência do método de Newton-Raphson. A divergência pode ser devida a uma fraca solução inicial ou devida ao método iterativo. Num estudo apresentado em [3.52] e [3.53], 9% das simulações não convergiram e os autores demonstraram que o uso de um factor de relaxação baixo (factor que condiciona o incremento entre duas simulações, este pode variar entre 0 e 1) melhora a convergência, mas, aumenta o número de iterações (tanto a inicialização como a optimização do factor de relaxação são opções do utilizador no software COMIS).

3.4.4. MODELOS TIPO ZONAL

Uma grande variedade de modelos tem sido desenvolvida para estudar o escoamento do ar, a análise térmica e o transporte de poluentes. Estes modelos podem ser divididos em duas grandes famílias: aqueles que recorrem a uma análise macroscópica (recorrem a uma divisão “grosseira” do espaço, por exemplo, os modelos multi-zona) e aqueles que recorrem a uma análise microscópica (recorrem a uma divisão “fina” do espaço, por exemplo, os modelos CFD, ver §3.4.5). Os modelos macroscópicos apresentam a vantagem de permitirem uma fácil definição do estudo, preverem os grandes movimentos de ar no interior dos edifícios e serem facilmente integrados em modelos de simulação térmica. Os modelos microscópicos fornecem uma previsão detalhada dos campos de temperatura, velocidade e pressão, permitindo uma avaliação das condições locais de conforto e de qualidade do ar.

Um modelo tipo zonal é uma aproximação intermédia entre os modelos CFD e os modelos multi-zona. Obtêm resultados mais rapidamente que os modelos CFD e com exactidão suficiente para permitir uma previsão local do conforto térmico [3.54], [3.55]. Sendo

assim, os modelos tipo zonal são uma boa alternativa aos modelos tipo CFD, quando se pretende fazer uma análise anual ou sazonal.

Nos modelos tipo zonal, o espaço é dividido em diversas zonas, como nos modelos multi-zona. Contudo, neste caso, as zonas correspondem aos fluxos esperados no interior de cada compartimento. As zonas são paralelepipédicas, com fronteiras verticais e horizontais, e devem ter lados aproximadamente iguais a um metro [3.18] ou o compartimento deve ter entre 24 a 45 zonas [3.56] (comparativamente às dezenas ou centenas de milhar de zonas/células dos modelos CFD).

O ar considera-se como incompressível e cada zona é considerada como tendo temperatura e densidade uniforme e variação hidrostática da pressão. Nestas zonas são aplicadas equações de conservação da massa, de energia e a equação dos gases perfeitos. A resolução do sistema de equações tem como resultado os caudais de ar intrazona e a distribuição de temperaturas no compartimento. As equações mencionadas são as seguintes [3.54]:

$$\sum_{j=1}^{n} q_{\mathrm{ij}} + q_{\mathrm{fonte}} + q_{\mathrm{poço}} = 0 \tag{3.24}$$

$$\frac{dE_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n} \phi_{ij} + \phi_{fonte} + \phi_{poço} \tag{3.25}$$

em que:

- q: caudal mássico [kg/s];
- E: energia [J];
- ϕ: fluxo de calor [W].

Os índices i e j referem-se às zonas em estudo e os índices *fonte* e *poço* referem-se, respectivamente, a caudal/energia gerado e caudal/energia acumulado em cada zona.

Tendo em vista o cálculo dos caudais mássicos, as fronteiras entre zonas são consideradas totalmente permeáveis nas quais se aplica a lei de potência (ver §3.2). O coeficiente de escoamento pode ser tomado como sendo constante em todo o domínio (C = 0,83 m·s^{-1}·Pa^{-n}), ou variável, obtendo-se assim uma melhoria significativa nos resultados [3.57]. Na Figura 3.9 apresenta-se um esquema tipo de um modelo tipo zonal aplicado a uma zona.

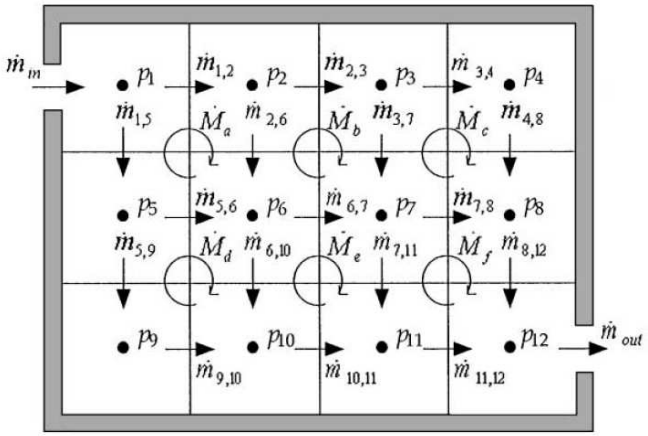


Figura 3.9 - Esquema tipo de um modelo zonal [3.58].

Em cada zona, o fluxo de calor é uma combinação dos fluxos convectivos entre as superfícies e o ar ambiente e do calor transportado pelo escoamento. Os fluxos são modelizados pelas equações [3.59]:

$$\Phi = h_c A \Delta T_{\text{s-ar}} \tag{3.26}$$

$$\Phi = c_p q \Delta T_{\text{z}} \tag{3.27}$$

em que:

- h_c: coeficiente de convecção [W·m^{-2}·K^{-1}];
- A: área da superfície [m^2];
- $\Delta T_{\text{s-ar}}$: diferença de temperatura entre a superfície e o ar ambiente [K];

- c_p: calor especifico a pressão constante [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$];

- ΔT_z: diferença de temperatura entre duas zonas [K].

Os fluxos devidos a fenómenos de radiação e condução também podem ser incluídos [3.59], [3.60].

Para ter em conta os sistemas de ventilação mecânica estes podem incluir leis semi-empíricas para simular, por exemplo, jactos e camadas limites térmicas (modelos híbridos [3.54]).

Este tipo de modelos pode ser acoplado a modelos multi-zona e de simulação térmica [3.59]. Na referência [3.61] apresenta-se uma adaptação do modelo multi-zona COMIS de modo a incluir um modelo tipo zonal. Com a integração de modelos de transferência de humidade [3.62], de conforto térmico (exemplo: indíce *PMV - Predicted mean vote*) [3.59] e modelos de previsão da distribuição de poluentes [3.61], [3.63], alargou-se bastante o campo de aplicação dos modelos tipo zonal. Também existem exemplos de aplicação do modelo tipo zonal aplicado a vários compartimentos em simultâneo (o que não é corrente em modelos do tipo CFD) [3.55].

Apesar de os modelos tipo zonal apresentarem resultados bastante semelhantes aos resultados dos modelos tipo CFD, os primeiros continuam a enfermar da desvantagem de não considerarem a energia cinética. Consideram somente uma variação hidrostática da pressão. Esta assunção corresponde a um fluido estático, o que não é uma assunção razoável, dado que o objectivo dos modelos macroscópicos é a previsão dos escoamentos. Sendo assim, para alguns tipos de escoamento (por exemplo para convecção forçada) os resultados afastam-se da realidade [3.54]. Para obstar a esta simplificação, têm surgido novas formulações para os modelos tipo zonal [3.58].

3.4.5. MODELOS TIPO CFD

Durante os últimos anos tem existido grande interesse em desenvolver software baseado na mecânica dos fluidos computacional (CFD) para prever o escoamento em compartimentos ventilados [3.18], [3.26].

Como é necessária uma análise microscópica da distribuição das variáveis físicas (ex.: massa, velocidade e temperatura) para efeitos da determinação do conforto térmico, ventilação, qualidade do ar e considerações energéticas, as equações tomam a forma de equações diferenciais às derivadas parciais. Cada equação descreve a conservação de uma variável dependente e é integrada para cada volume de controlo e isto implica que tem que haver conservação da grandeza física naquele volume. Estas são habitualmente conhecidas por equações de transporte e são as seguintes:

- equação de conservação da massa;
- equação de conservação da quantidade de movimento;
- equação de conservação da energia.

De modo a ultrapassar as dificuldades de modelar "directamente" fluxos turbulentos, normalmente, recorre-se a um modelo de turbulência.

O modelo de turbulência mais usado, é o modelo k-ε. Este modelo introduz duas equações de transporte, uma para a energia cinética turbulenta, k, e outra para a respectiva taxa de dissipação, ε, e apresenta, para aplicações em edifícios, um compromisso entre o nível de sofisticação e a eficiência computacional. Tem sido aplicado com sucesso a uma grande variedade de problemas de escoamento e requer necessidades computacionais inferiores a outros modelos. No entanto, apresenta algumas simplificações que, pontualmente, poderão conduzir a resultados com maior incerteza, tais como a assunção de turbulência isotrópica e a aplicação a escoamentos com alto número de Reynolds (não aplicável junto a superfícies, sendo assim necessita de funções de parede).

Com os modelos CFD podemos obter, entre outras, as seguintes grandezas em qualquer ponto do local em estudo:

- velocidade do ar (3 componentes);
- temperatura e temperatura média radiante;
- indices de conforto (*PMV* - Predicted mean vote; *PPD* - Predicted percentage of dissatisfied; *DR* - Draught risk).

Apesar das potencialidades dos modelos tipo CFD, estes podem apresentar algumas dificuldades de implementação, tais como: inadequadas condições de fronteira, modelos de turbulência não adequados (ex.: turbulência isotrópica) e erros ou simplificações na introdução dos dados geométricos. No entanto, estes modelos permitem simulações relativamente rápidas e facilmente adaptáveis, dispensando, quando validados, modelos experimentais em escala reduzida ou real [3.26].

3.5. ACOPLAMENTO ENTRE MODELOS

Num modelo multi-zona a pressão do vento na fachada e as temperaturas exterior e interior são importantes condições de fronteira. As temperaturas dos compartimentos podem ser calculadas com base num modelo dinâmico de simulação térmica. Neste caso, as acções térmicas (ex.: pessoas, equipamento de escritório ou ganhos solares), a temperatura exterior e o escoamento de ar no edifício são as condições de fronteira.

Somente com uma simulação simultânea dos fluxos térmicos e de ar é que a interdependência destes pode ser considerada e assim os sistemas do edifício (ex.: sistema de ventilação ou AVAC) podem ser dimensionados satisfatoriamente, Figura 3.10.

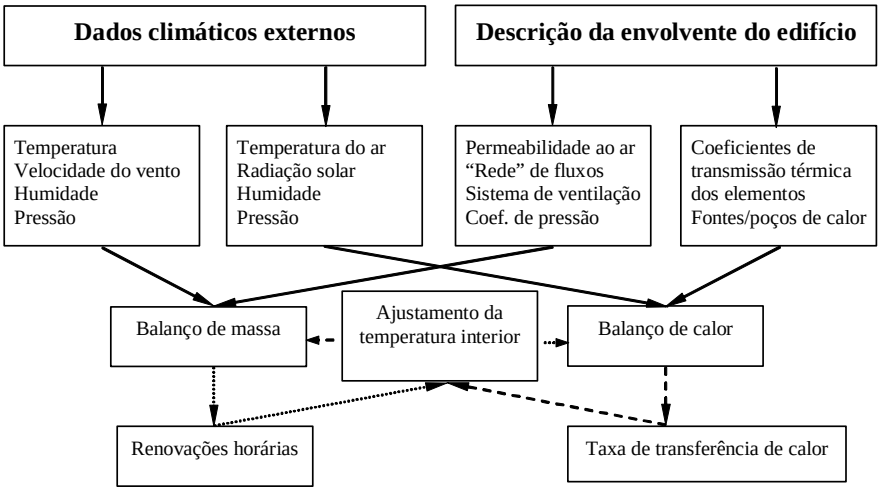


Figura 3.10 - Fluxograma do acoplamento entre a modelação térmica e de fluxos de ar (adaptado de [3.4]).

Sendo assim, por exemplo, o programa COMIS foi inserido em programas de simulação térmica [3.64], [3.65] (referência [3.65] disponível em http://www.eere.energy.gov/ buildings/energyplus/).

À semelhança dos modelos multi-zona e zonal, também os modelos CFD podem ser acoplados a modelos de simulação térmica ou multi-zona [3.66]. Sendo assim, os programas de simulação térmica Energyplus [3.67], ESP-r [3.68], [3.69], e TRNSYS [3.70] foram adaptados de forma a permitirem, pelo menos numa zona, o cálculo detalhado do escoamento. O factor chave no acoplamento "CFD - simulação térmica" é o fluxo de calor das superfícies [3.67], sendo assim, os modelos de simulação térmica podem fornecer as temperaturas superficiais como condições fronteira, enquanto que os modelos CFD podem fornecer os fluxos de calor convectivos superficiais (menos frequentemente, podem fornecer também os fluxos radiativos).

Os coeficientes de convecção empíricos usados normalmente nos programas de simulação térmica podem ser substancialmente diferentes dos reais. Sendo assim, este acoplamento produz resultados mais fiáveis e detalhados em relação à simulação separada, pois permite que as hipóteses de cálculo adoptadas individualmente pelos dois tipos de modelos sejam eliminadas devido à complementaridade da informação fornecida pelos modelos [3.64]. Na Figura 3.11 pode observar-se como funciona este tipo de acoplamento aplicado a uma zona.

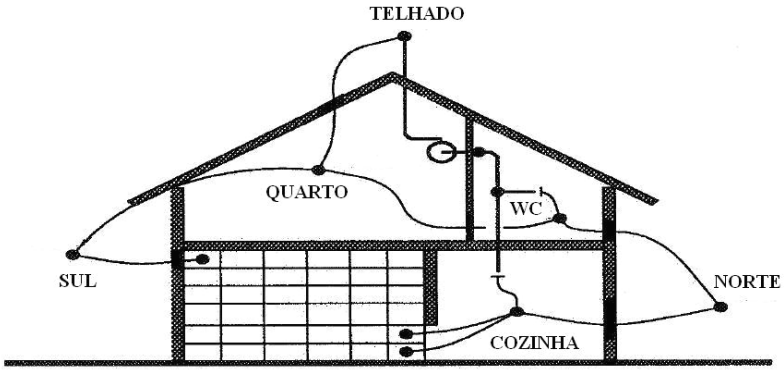


Figura 3.11 - Acoplamento entre modelos de simulação térmica e CFD (adaptado de [3.71]).

3.6. SÍNTESE CRÍTICA

Na fase conceptual de um edifício, os dados existentes para uma eventual simulação são muito limitados. Somente ferramentas muito simples poderão ser utilizadas nesta fase por arquitectos e engenheiros, de modo a seleccionar e dimensionar um sistema de ventilação. Nesta fase, os utilizadores das ferramentas de análise poderão não ter experiência com a modelação física e matemática. Sendo assim, as ferramentas de análise terão que ser robustas e fáceis de usar. Por outro lado, resultados mais fiáveis, requerendo ferramentas mais sofisticadas, são necessários numa fase posterior de detalhe, de modo a permitir a finalização das opções. Deste modo, métodos simples, analíticos e empíricos, são muito úteis para a fase conceptual, enquanto que os modelos multi-zona e CFD (ou zonal), de preferência acoplados a modelos de simulação térmica, são aplicáveis na fase de detalhe. No entanto, à medida que as ferramentas se forem tornando mais atractivas, nomeadamente, através de interfaces gráficas fáceis de usar e através de um conhecimento dos dados necessários para simulação, é possível e desejável que estes últimos modelos sejam utilizados numa fase conceptual [3.46].

No âmbito da presente tese, e em face da vasta bibliografia contendo modelação, tanto a nível internacional como nacional, definiu-se uma estratégia que preteriu a modelação em favor de uma vasta campanha experimental (quase inexistente em Portugal). Sendo assim, a campanha referida é apresentada em §6.

BIBLIOGRAFIA DO CAPÍTULO 3

[3.1] Silva, F., Ventilação Natural de Edifícios. Turbulência Atmosférica, Tese de Doutoramento Submetida ao IST, Lisboa, 2003.

[3.2] Andersen, K., Theory for Natural Ventilation by Thermal Buoyancy in One Zone with Uniform Temperature, Building and Environment, Vol. 38, 2003, p. 1281-1289.

[3.3] Feustel, H. *et al*, Fundamentals of the Multizone Airflow Model. COMIS, Technical Note 29, Annex 5-AIVC, IEA-ECBCS, 1990.

[3.4] Orme, M.; Leksmono, N., Ventilation Modelling Data Guide, AIVC Guide 5, Annex 5-AIVC, IEA-ECBCS, 2002.

[3.5] Santamouris, M., Advances in Passive Cooling, Earthscan, 2007.

[3.6] CIBSE, Environmental Design. CIBSE Guide A, Chartered Institution of Building Services Engineers, London, 2006.

[3.7] Saraiva, J., Boundary Layer Above Urban Areas, Contribuição para o Projecto Pascool (EU), LNEC, 1994.

[3.8] Gomes, M.; Rodrigues, A.; Mendes, P., Determinação Experimental e Numérica de Coeficientes de Pressão em Edifícios com Formas Irregulares, Construção 2004 - 2.º Congresso Nacional da Construção, Porto, 2004.

[3.9] Silva, F.; Saraiva, J., Determination of Pressure Coefficients Over Simple Shaped Building Models Under Different Boundary Layers, Contribuição para o Projecto Pascool (EU), INETI, 1994.

[3.10] Silva, F.; Saraiva, J., Determination of Pressure Coefficients Over Real Building Models, Contribuição para o Projecto Pascool (EU), INETI-LNEC, 1994.

[3.11] Gomes, M., Acção do Vento em Edifícios. Determinação de Coeficientes de Pressão em Edifícios em L e U, Tese de Mestrado Submetida ao IST, Lisboa, 2003.

[3.12] Decreto-Lei n.º 253/1983, Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA), 31 de Maio, Diário da República, I Série, Lisboa, 19836.

[3.13] Grosso, M., Wind Pressure Distribution Around Buildings. A Parametrical Model, Energy and Buildings, Vol. 18, 1992, p. 101-131.

[3.14] Santamouris, M.; Asimakopoulos, D., Passive Cooling of Buildings, James & James, 1996.

[3.15] Knoll, B.; Phaff, J.; Gids, W., Pressure Simulation Program, 16th AIVC Conference, Palm Springs, USA, 1995.

[3.16] Sandberg, M., Wind Induced Airflow through Large Opening, Technical Report TR24, CD Annex 35, IEA-ECBCS, 2002.

[3.17] Kobayashi, T. *et al*, Prediction of Cross-Ventilation Rate trough Large Openings. Problems of Conventional Method, 10th Roomvent Conference, Helsinki, Finland, 2007.

[3.18] Allard, F., Natural Ventilation in Buildings. A Design Handbook, James & James, 1998.

[3.19] Haghighat, F.; Brohus, H.; Tao, J., Modelling Air Infiltration due to Wind Fluctuations. A Review, Building and Environment, Vol. 35, 2000, p. 377-385.

[3.20] Etheridge, D.; Sandberg, M., Building Ventilation. Theory and Measurement, John Wiley & Sons, 1996.

[3.21] LNEC, Curso sobre "Ventilação Natural de Edifícios de Habitação", Lisboa, 1999.

[3.22] Heijmans, N.; Wouters, P., Impact of the Uncertainties on Wind Pressures on the Prediction of Thermal Comfort Performances, Technical Report TR23, CD Annex 35, IEA-ECBCS, 2002.

[3.23] Dorer, V.; Pfeiffer, A.; Weber, A., Parameters for the Design of Demand Controlled Hybrid Ventilation Systems for Residential Buildings, Technical Note 59, Annex 5-AIVC, IEA-ECBCS, 2005.

[3.24] ASHRAE, Fundamentals Handbook, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 1997.

[3.25] Ghiaus, C.; Allard, F., Natural Ventilation in the Urban Environment, Earthscan, 2005.

[3.26] Awbi, H., Ventilation of Buildings, 2nd Edition, E & FN Spon, 2003.

[3.27] BSI, Code of Practice for Design of Buildings. Ventilation Principles and Designing for Natural Ventilation, BS 5925, British Standards Institution, London, 1991.

[3.28] Chiu, Y.; Etheridge, D., Calculations and Notes on the Quadratic and Power Law Equations for Modelling Infiltration, International Journal of Ventilation, Vol. 1, 2002, p. 65-77.

[3.29] Heiselberg, P.; Svidt, K.; Nielsen, P., Windows. Measurements of Air Flow Capacity, 8th Roomvent Conference, Reading, United Kingdom, 2000.

[3.30] Heiselberg, P.; Svidt, K.; Nielsen, P., Characteristics of Airflow from Open Windows, Energy and Buildings, Vol. 36, 2001, p. 859-869.

[3.31] Karava, P.; Stathopoulos, T.; Athienitis, A., Wind Driven Flow Through Openings. A Review of Discharge Coefficients, International Journal of Ventilation, Vol. 3, 2004, p. 255-266.

[3.32] Kobayashi, T. *et al*, Wind Driven Flow trough Openings. Analysis of the Stream Tube, International Journal of Ventilation, Vol. 4, 2006, p. 323-336.

[3.33] Decreto-Lei n.º 80/2006, Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), 4 de Abril, Diário da República, I Série-A, Lisboa, 2006.

[3.34] Li, Y., Analysis of Natural Ventilation. A Summary of Existing Analytical Solutions, Technical Report TR12, CD Annex 35, IEA-ECBCS, 2002.

[3.35] Maas, J., Air Flow Through Large Openings in Buildings, Annex 20, IEA-ECBCS, 1992.

[3.36] Toledo, E., Ventilação Natural dos Edifícios, LNEC, Lisboa, 1967.

[3.37] Etheridge, D., Nondimensional Methods for Natural Ventilation Design, Building and Environment, Vol. 37, 2002, p. 1057-1072.

[3.38] Silva, F.; Saraiva, J., A Simplified Model do Estimate Natural Ventilation Flows Crossing Simple Dwellings Layouts, International Journal of Ventilation, Vol. 3, 2005, p. 353-362.

[3.39] CEN, Ventilation for Buildings. Calculation Methods for the Determination of Air Flow Rates in Dwellings, EN 13 465, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2004.

[3.40] Viegas, J., Ferramenta Simplificada para a Previsão do Desempenho da Ventilação Natural, Seminário sobre Aplicação da Ventilação Natural e Mista, LNEC, 2007.

[3.41] Feustel, H.; Dieris, J., A Survey of Airflow Models for Multizone Structures, Energy and Buildings, Vol. 18, 1992, p. 79-100.

[3.42] Warren, P., Multizone Air Flow Modelling (COMIS), Technical Synthesis Report, Annex 23, IEA-ECBCS, 2000.

[3.43] Haas, A. *et al*, COMIS v3.1 Simulation Environment for Multizone Air Flow and Pollutant Transport Modelling, Energy and Buildings, Vol. 34, 2002, p. 873-882.

[3.44] Fürbringer, J.; Roulet, C.; Borchiellini, R., Evaluation of COMIS. Final Report, Annex 23, IEA-ECBCS, 1996.

[3.45] Fürbringer, J.; Roulet, C.; Borchiellini, R., Evaluation of COMIS. Appendices, Annex 23, IEA-ECBCS, 1996.

[3.46] Li, Y.; Heiselberg, P., Analysis Methods for Natural and Hybrid Ventilation. A Critical Literature Review and Recent Developments, International Journal of Ventilation, Vol. 2, 2003, p. 3-20.

[3.47] Li, Y. *et al*, Some Examples of Solution Multiplicity in Natural Ventilation, Building and Environment, Vol. 36, 2001, 851-858.

[3.48] Axley, J.; Chung, D., POWBAM0. Mechanical Power balances for Multi-zone Building Airflow Analysis, International Journal of Ventilation, Vol. 4, 2005, p. 95-112.

[3.49] Gids, W., Methods for Vent Sizing in the Pre Design Stage, Technical Report TR13, CD Annex 35, IEA-ECBCS, 2002.

[3.50] Axley, J., Design and Simulation of Natural Ventilation Systems Using Loop Equations, 6th Healthy Buildings Conference, Espoo, Finland, 2000.

[3.51] Emmerich, S.; Dols, W.; LoopDA. A Natural Ventilation System Design and Analysis Tools, 8th IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands, 2003.

[3.52] Li, Y., Spurious Numerical Solutions in Coupled Natural Ventilation and Thermal Analyses, International Journal of Ventilation, Vol. 1, 2002, p. 1-12.

[3.53] Lorenzetti, D.; Sohn, M., Improving Speed and Robustness of the COMIS Solver, 7th Roomvent Conference, Reading, United Kingdom, 2000.

[3.54] Teshome, E.; Haghighat, F., Zonal Models for Indoor Air Flow. A Critical Review, International Journal of Ventilation, Vol. 3, 2004, p. 119-129.

[3.55] Megri, A.; Snyder, M.; Musy, M., Building Zonal Thermal and Airflow Modelling. A Review, International Journal of Ventilation, Vol. 4, 2005, p. 177-188.

[3.56] Musy, M. *et al*, Automatically Generated Zonal Models for Building Air Flow Simulation. Principles and Applications, Building and Environment, Vol. 37, 2002, p. 873-881.

[3.57] Teshome, E.; Haghighat, F., Macroscopic and Microscopic Analysis of Zonal Models, 9th International IBPSA Conference, Montréal, Canada, 2005.

[3.58] Axley, J., Surface-drag Flow Relations for Zonal Modelling, Building and Environment, Vol. 36, 2001, p. 843-850.

[3.59] Haghighat, F.; Li, Y.; Megri, A., Development and Validation of a Zonal Model. POMA, Building and Environment, Vol. 36, 2001, p. 1039-1047.

[3.60] Musy, M. *et al*, Generation of a Zonal Model to Simulate Natural Convection in a Room With Radiative/Convective Heater, Building and Environment, Vol. 36, 2001, p. 589-596.

[3.61] Stewart, J.; Ren, Z., COwZ. A Subzonal Indoor Airflow, Temperature and Contaminant Dispersion Model, Building and Environment, Vol. 41, 2006, p. 1631-1648.

[3.62] Mendonça, K. *et al*, A Zonal Model for Predicting Simultaneous Heat and Moisture Transfer in Buildings, 9th Indoor Air Conference, Monterey, USA, 2002.

[3.63] Huang, H.; Haghighat, F.; Yoshino, H., An Integrated Zonal Model for Predicting Airflow and VOC Concentration Distributions in a Room, 7th Healthy Buildings Conference, National University of Singapore, Singapore, 2003.

[3.64] Weber, A. *et al*, TRNFLOW. Integration of COMIS into TRNSYS TYPE 56, 23rd AIVC Conference, Lyon, France, 2002.

[3.65] Huang, J. *et al*, Linking the COMIS Multizone Airflow Model with the Energyplus Building Energy Simulation Program, 6th IBPSA Conference, Kyoto, Japan, 1999.

[3.66] Santamouris, M.; Wouters, P., Bulding Ventilation. The State of Art, Earthscan, 2006.

[3.67] Zhai, Z.; Chen, Q., Performance of Coupled Building Energy and CFD Simulations, Energy and Buildings Vol. 37, 2005, p. 333-344.

[3.68] Negrão, C., Integration of Computational Fluid Dynamics with Building Thermal and Mass Flow Simulation, Energy and Buildings, Vol. 27, 1998, p. 155-165.

[3.69] Bartak, M. *et al*, Integrating CFD and Building Simulation, Building and Environment, Vol. 37, 2002, p. 865-871.

[3.70] Dorer, V.; Haas, A., Aspects of Air and Heat Distribution in Low Energy Residential Buildings, 24th AIVC Conference, Washington, USA, 2003.

[3.71] Clarke, J.; Hensen, J.; Negrão, C., Predicting Indoor Air Flow by Combining Network Approach, CFD and Thermal Simulation, 16th AIVC Conference, Palm Springs, USA, 1995.

4. TÉCNICAS EXPERIMENTAIS UTILIZADAS

4.1. OBJECTIVO DO CAPÍTULO

Na sequência do exposto na síntese crítica do §3, o principal objectivo desta tese prende-se com a determinação das renovações horárias e caudais obtidos num sistema de ventilação misto. Sendo assim, este capítulo descreve os principais métodos de medição actualmente usados para determinar os fluxos de ar devidos aos sistemas de ventilação bem como a permeabilidade da envolvente (métodos do gás traçador e de pressurização [4.1]). Refira-se que na campanha experimental desta tese, também se usou a técnica da anemometria, aplicada na determinação da velocidade em condutas.

O método do gás traçador foi o mais usado na campanha experimental realizada, pelo que se apresenta com maior detalhe, particularmente, as técnicas do declive e PFT (técnica de medição passiva). Para cada uma das técnicas, apresenta-se o princípio de medição, a normalização existente, os procedimentos, os exemplos de aplicação a nível internacional e em Portugal e a exactidão e incerteza da técnica. Descreve-se, também, o procedimento de medição do gás traçador dos dispositivos usados nos ensaios.

4.2. MÉTODO DO GÁS TRAÇADOR

4.2.1. DESCRIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DAS TÉCNICAS DO MÉTODO DO GÁS TRAÇADOR

O método do gás traçador tem por objectivo “marcar” o ar que está a ser estudado de modo a que se possa “segui-lo” no decurso da experiência e assim registar a história da sua

evolução. Consiste na introdução no compartimento a ser testado de uma determinada quantidade de um gás pouco comum na atmosfera - gás traçador -, registando-se a evolução da sua concentração ao longo do tempo. Em edifícios que recorram à ventilação natural, com infiltrações e exfiltrações, o método do gás traçador é o único que pode ser usado para medir a distribuição dos fluxos pelos espaços dos edifícios.

Podem-se dividir as diferentes técnicas de implementação do método do gás traçador em diversas categorias. Dependendo do objectivo da medição, podem ser usadas técnicas transientes ou permanentes/estacionárias [4.2]:

- técnicas transientes, são usadas para determinar a constante de tempo nominal, τ_n, ou a renovação horária (*RPH* [h^{-1}]). O gás traçador é injectado de modo a se obterem variações da sua concentração ao longo do tempo;
- técnicas estacionárias, têm por objectivo obter ou manter uma concentração aproximadamente constante do gás traçador com o fim de estimarem directamente os fluxos de ar.

A constante de tempo nominal é definida como sendo a idade média do ar (ver §4.2.5) nos pontos de extracção do sistema de ventilação [4.2].

$$q\,\tau_n = V \tag{4.1}$$

em que:

- q: caudal volúmico de ar exterior [m^3/s];
- τ_n: constante de tempo nominal [s];
- V: volume efectivo da zona (espaço ventilado, retirando mobília, equipamentos, etc.) [m^3].

A constante de tempo nominal e as renovações horárias estão relacionadas por:

$$\tau_n = 1/RPH \tag{4.2}$$

A renovação horária é definida como sendo o caudal volúmico de ar exterior que entra (ou sai) do espaço dividido pelo volume efectivo do espaço. Uma renovação por hora quer dizer que o volume total de ar que atravessa um espaço fechado em uma hora é igual ao volume desse espaço. No entanto, isto não quer dizer necessariamente que todo o ar interior seja completamente renovado.

Ambos os tipos de técnicas, transientes ou estacionárias, podem ser usadas na determinação dos caudais. Contudo, o erro na determinação dos caudais por via indirecta é maior (obtendo primeiro a constante de tempo nominal - técnicas transientes), devido à incerteza na obtenção do volume efectivo.

Dependendo do tipo de controlo e emissão, podem-se classificar as técnicas do gás traçador da seguinte forma [4.2], [4.3], [4.4]:

- T1: técnica do declive (ou concentração decrescente). Uma quantidade de gás é injectada no espaço a medir. É estabelecida uma concentração inicial uniforme recorrendo a ventiladores. O decaimento da concentração do gás ao longo do tempo é registado de forma a obter a renovação horária (*RPH*) - técnica transiente. É a técnica mais usada, mas tem como desvantagem a pequena duração do ensaio pelo que a taxa de renovação de ar obtida é característica somente daquele intervalo de tempo;
- T2: técnica da fonte (ou concentração crescente). O gás é injectado a uma taxa constante e a variação da concentração ao longo do tempo é registada - técnica transiente. A técnica da fonte só se aplica enquanto a concentração crescer;
- T3: técnica da emissão constante. O gás é injectado a uma taxa constante e somente se aplica a técnica após a obtenção de uma concentração aproximadamente constante (fase final da técnica da fonte) - técnica estacionária. Pode ser usada para medições prolongadas;
- T4: técnica da emissão constante com emissão e recolha passiva (PFT);
- T5: técnica da emissão pulsada (ou pulso). Uma pequena quantidade de gás é injectada no espaço. A evolução da concentração do gás ao longo do tempo é registada - técnica transiente. Devido à pequena quantidade de gás aplicada, não é

aconselhada a utilização desta técnica para o cálculo das renovações de ar, quando estas são elevadas no espaço em estudo;

- T6: técnica da concentração constante. O gás é injectado, sob controlo, no espaço de modo a que se obtenha uma concentração constante ao longo do tempo - técnica estacionária. A variação da taxa de libertação de gás é registada. Pode ser usada para medições prolongadas.

As duas primeiras técnicas são complementares, isto é, consegue-se retirar a mesma informação realizando um procedimento ou outro [4.5], [4.6], sendo, preferível, na prática, a técnica do declive, já que nesta não se necessita do conhecimento do valor da massa do gás traçador injectado.

Listam-se no Quadro 4.1 as técnicas utilizadas na presente tese, evidenciando-se o tipo de emissão, recolha, o resultado directo, o tipo de medição e o custo.

Quadro 4.1 - Técnicas utilizadas (adaptado de [4.2] e [4.6]).

Técnica	Emissão	Recolha	Resultado directo	Medições contínuas	Custo
T1: Declive	Pequena emissão (antes do ensaio)	Contínua	RPH ou τ_n	Não	Moderado
T3: Emissão constante	Constante	Contínua	q	Sim[(c)]	Moderado
T4: PFT	Constante (passiva)	Contínua (passiva)	RPH_{local}[(a)] ou τ_p[(b)]	Não	Moderado
T6: Concentração constante	Controlada	Contínua	q	Sim[(c)]	Alto

Notas:
- a: taxa local de ventilação específica [h^{-1}] (ver §4.2.5);
- b: idade média do ar num determinado ponto [h] (ver §4.2.5);
- c: à excepção do caso de multi-zona com um único gás.

4.2.2. CARACTERÍSTICAS DOS GASES TRAÇADORES

A dispersão do gás traçador num espaço resulta da combinação dos seguintes fenómenos [4.6], [4.7]:

- movimento do próprio gás, resultante da diferença de peso molecular entre o gás traçador e o ar;

- difusão molecular do gás traçador;
- transporte do gás traçador pelo ar devido a fenómenos de convecção. Um gás ideal deve ser dinamicamente passivo, isto é, deve seguir o movimento do ar, acção para a qual é necessário que tenha a mesma densidade que este.

O gás traçador deverá reunir várias características, nomeadamente [4.2], [4.6], [4.8]:

- facilmente detectável, preferencialmente a baixas concentrações;
- possuir baixas concentrações no ar exterior e interior (as concentrações deverão estar sensivelmente abaixo das usadas nos ensaios);
- não inflamável e não explosivo;
- peso molecular aproximadamente idêntico ao do ar (peso molecular do ar igual a 29 g/mol) ou diluído no ar para assegurar boa mistura;
- não ser produzido nem adsorvido na zona em estudo, nem sofrer decomposição ou reagir com o ar ou componentes do edifício;
- não ser dispendioso;
- não tóxico e sem risco para a saúde dentro dos limites usados;
- inodoro, insípido e incolor (preferencialmente);
- ambientalmente inerte.

Nenhum gás satisfaz globalmente todos os requisitos acima mencionados. Assim, a utilização de um ou outro gás é função de vários condicionalismos, nomeadamente da sua facilidade de aquisição. Teoricamente, é indistinta a utilização de qualquer gás [4.5].

Apresenta-se no Quadro 4.2 um resumo das características dos gases mais frequentemente usados e no Quadro 4.3 uma análise comparativa dos mesmos.

Quadro 4.2 - Propriedades dos gases mais frequentemente usados (adaptado de [4.2], [4.8] e [4.9]).

Nome	Fórmula química	Peso molecular [g/mol]	Densidade / Densidade do ar	Concentração exterior [ppm]	Limite mínimo de detecção [ppm]	Limite de exposição permitido[g] [ppm]
Dióxido de carbono[a]	CO_2	44	1,53	360	3[e]	5000
Óxido nitroso ou Protóxido de azoto[b]	N_2O	44	1,53	0,315	0,05[e]	25-100
Hexafluoreto de enxofre	SF_6	146	5,10	$0,85\text{-}1,5\times10^{-6}$	0,005[e]	1000
Perfluorobenzeno - PB[c]	C_6F_6	186	(6,4)[d]	$< 1\times10^{-6}$	5×10^{-5} [f]	-
Perfluorometilbenzeno - PMB[c]	C_7F_8	236	(8,1)[d]	$< 1\times10^{-6}$	5×10^{-5} [f]	-

Notas:
- a: deve ser usado com especial cuidado devido às fontes normalmente presentes nos locais habitados. A concentração exterior deve ser tida em conta;
- b: o N_2O é produzido pelos aparelhos de combustão normalmente existentes nos edifícios residenciais;
- c: gases usados na técnica da emissão constante passiva (PFT);
- d: nas condições normais (PTN) os gases estão na fase líquida;
- e: com detector fotoacústico;
- f: com cromatografia gasosa e detector de captura de electrões;
- g: concentração máxima média permitida nos locais de trabalho (8 horas de exposição).

Recomenda-se usar uma concentração máxima de um décimo do limite de exposição permitido [4.9]. É também recomendável usar uma concentração mínima de 100 vezes a concentração mínima detectável, de forma a ter-se uma resposta linear do equipamento [4.2], [4.10].

Quadro 4.3 - Qualidade de alguns gases (adaptado de [4.2]).

	Características do gás							
Nome	Não inflamável nem explosivo	Não tóxico	Densidade próxima do ar	Não é adsorvido nem reage	Fácil de analisar	Baixa concentração exterior	Sem fontes no espaço a medir	Não dispendioso
Dióxido de carbono	++	-	+	-	++	--	--	++
Óxido nitroso ou Protóxido de azoto	(a)	-	+	-	+	+	+	++

Notas:
- Nível de qualidade: ++ Muito bom; + Bom; - Não tão bom; -- Muito mau;
- a: Não é combustível, mas é um bom oxidante a altas concentrações e temperatura;
- b: Não é combustível, mas decompõe-se em chama produzindo químicos tóxicos.

Quadro 4.3 - Qualidade de alguns gases (adaptado de [4.2]) (continuação).

	Características do gás							
Nome	Não inflamável nem explosivo	Não tóxico	Densidade próxima do ar	Não é adsorvido nem reage	Fácil de analisar	Baixa concentração exterior	Sem fontes no espaço a medir	Não dispendioso
Hexafluoreto de enxofre	(b)	+	-	+	++	++	++	+
Perfluorocarbonos (PFTs)	++	++	--	++	+	++	++	++

Notas:
- Nível de qualidade: ++ Muito bom; + Bom; - Não tão bom; -- Muito mau;
- a: Não é combustível, mas é um bom oxidante a altas concentrações e temperatura;
- b: Não é combustível, mas decompõe-se em chama produzindo químicos tóxicos.

Nas diversas campanhas experimentais realizadas, à excepção do ensaio descrito em §4.4, e em face dos equipamentos e técnicas usadas, recorreu-se ao uso dos gases Hexafluoreto de enxofre (SF_6), Perfluorobenzeno (PB) e Perfluorometilbenzeno (PMB), estes dois últimos na técnica PFT.

4.2.3. TÉCNICA DO DECLIVE

Princípio

As equações usadas no método do gás traçador baseiam-se na conservação da massa do ar e do gás traçador. As principais hipóteses admitidas para deduzir estas equações, para um edifício multi-zona, são [4.2], [4.11]:

- em cada zona, a concentração do gás é homogénea (concentração uniforme);
- o ar que entra numa zona não modifica a homogeneidade da concentração do gás traçador nessa zona, isto é, assume-se uma perfeita e imediata mistura;
- a pressão atmosférica é constante e homogénea;
- a emissão do gás traçador não altera a densidade do ar;
- a temperatura do ar, bem como a densidade, não varia com o tempo;
- a temperatura do ar, bem como a densidade, é uniforme em todo o edifício e no exterior.

A primeira hipótese é a mais difícil de atingir. Na prática, uma concentração uniforme só é conseguida através do uso de pequenos ventiladores. A penúltima hipótese é satisfeita quando a variação relativa da temperatura é menor que a variação relativa da concentração. A última hipótese pode ser satisfeita se as temperaturas das várias zonas não diferirem significativamente, se o volume do gás injectado for medido à temperatura do ar no edifício e se o edifício não é aquecido ou arrefecido [4.2].

Para o caso de uma zona e supondo as seguintes hipóteses:

- o regime é permanente (temperatura exterior e vento estacionários - caudais aproximadamente constantes);
- a concentração do gás traçador no exterior é nula;
- não há emissão nem adsorção de gás,

o balanço de massa do gás traçador pode ser expresso pela seguinte equação diferencial [4.5]:

$$V\frac{dc(t)}{dt} = -\,qc(t) \tag{4.3}$$

em que:

- V: volume efectivo da zona [m^3];
- c: concentração em volume do gás traçador [-];
- q: caudal volúmico de ar exterior [m^3/s].

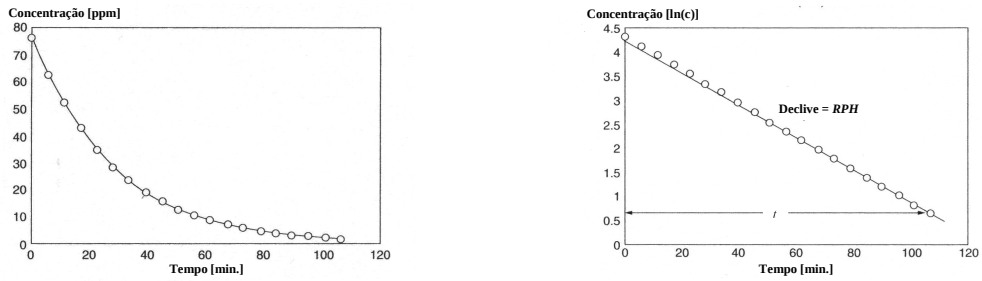
A solução da equação anterior é:

$$c(t) = c_0 e^{-(q/V)t} \tag{4.4}$$

em que c_0 é a concentração inicial, em volume [-], do gás traçador. Rearranjando esta última equação, obtém-se:

$$\frac{q}{V} = RPH = \ln\left(\frac{c_0}{c(t)}\right) / t \tag{4.5}$$

Para o cálculo das infiltrações ou caudais de ventilação em edifícios que possam ser considerados como uma única zona, é suficiente introduzir gás traçador no espaço até uma concentração inicial uniforme, c_0. Sendo assim, basta registar graficamente o logaritmo da concentração *versus* tempo, que pela equação (4.5) é uma recta. O módulo do declive desta recta, $\frac{q}{V}$, é a incógnita que permite o cálculo das renovações horárias, *RPH* (ver Figura 4.1).



a) b)

Figura 4.1 - Técnica do declive, a) decaimento da concentração do gás traçador, b) gráfico do logaritmo da concentração *versus* tempo (adaptado de [4.1]).

Se eventualmente na Figura 4.1 b) existir uma zona inicial não linear, esta deve ser retirada do cálculo do declive, porque revela que ainda não estão atingidas as condições estacionárias para a realização do ensaio.

Pode-se considerar que espaços sujeitos a ventilação natural, com dimensões paralelipipédicas correntes (até $6\times4\times3$ m^3), poderão ser considerados como uma única zona. Se o pé-direito for significativamente superior a 3 m, será de prever que exista estratificação no espaço considerado, não se podendo, portanto, considerar aquele como zona única [4.5], [4.12].

Em face da curta duração do ensaio, a renovação horária resultante da equação (4.5) é válida somente para uma dada situação climatérica. Variando esta, deverá repetir-se o ensaio.

A aplicação da técnica do declive a espaços com vários compartimentos exige que se considere o espaço como uma única zona (monozona). Sendo assim, a concentração inicial do gás traçador terá que ser aproximadamente igual em todas as zonas. Apesar do uso de ventiladores, a idade média do ar (ver §4.2.5) nos compartimentos com entrada de ar será menor que a constante de tempo nominal (idade média do ar à saída), $\tau_{n,}$ e será maior nos outros [4.13]. No entanto, o declive do decaimento da concentração reflecte a idade média para todo o edifício. Se a idade média é aproximadamente igual à constante de tempo nominal (concentração uniforme), então o inverso do declive fornecerá uma boa estimativa da renovação horária global.

A renovação horária global é calculada recorrendo a uma média harmónica das renovações [4.14].

$$RPH_{\text{global}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{RPH_i}} \tag{4.6}$$

em que:

- RPH_{global}: renovação horária global [h^{-1}];
- RPH_{i}: renovação horária em cada zona [h^{-1}];
- n: número de zonas.

Procedimentos e normalização

Através da análise da bibliografia [4.2], [4.6] e da normalização existente para este ensaio [4.9], [4.12], [4.15], [4.16], podem-se apresentar alguns procedimentos aconselhados para esta técnica:

- antes de injectar o gás, verificar a concentração de “fundo” do gás a medir de modo a corrigir as medições, caso necessário;
- uso de um ventilador rotativo (30 W) em cada zona, a rodar a baixa velocidade, posicionado a jusante da sonda de emissão de gás e direccionado para o centro do compartimento. Nos compartimentos de maior dimensão (ex.: sala) usar dois ventiladores;
- a emissão de gás pode ser colocada no ventilador rotativo devidamente fixada;
- a recolha do gás pode ser localizada a metade da altura da zona e afastada da emissão e de janelas;
- após a emissão do gás e com o ventilador a funcionar, esperar 2 a 3 minutos até se iniciar o ensaio (tempo estimado para se obter uma concentração uniforme);
- cada tubo de recolha ou emissão deve ser usado somente numa destas funções.

Em edifícios monozona, para testar a uniformidade da concentração inicial, preconiza-se que a variação da concentração não exceda 10% da concentração média (para uma incerteza de 10% e 95% de nível de confiança, respeitando a precisão[1] do analisador de 5%) [4.9], [4.15].

De forma a minimizar os erros, o intervalo entre medições deve ser menor que dois minutos [4.2] e deverão registar-se, no mínimo, cinco valores [4.9]. Quanto ao tempo de ensaio, este deverá ser aproximadamente igual à constante de tempo nominal, τ_n, com no mínimo uma hora [4.2], [4.3], [4.6], [4.12].

A título ilustrativo, apresenta-se na Figura 4.2 o posicionamento dos ventiladores.

[1] Actualmente, o termo repetibilidade deve ser usado em vez de precisão.

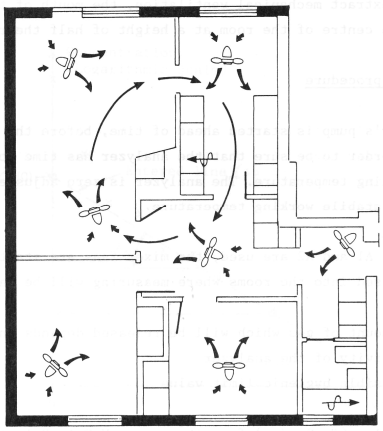


Figura 4.2 - Posicionamento dos ventiladores [4.12].

Também a título ilustrativo, apresenta-se na Figura 4.3 o equipamento tipo a usar no método do gás traçador. A necessidade de utilização de cada dispositivo depende da técnica específica a utilizar.

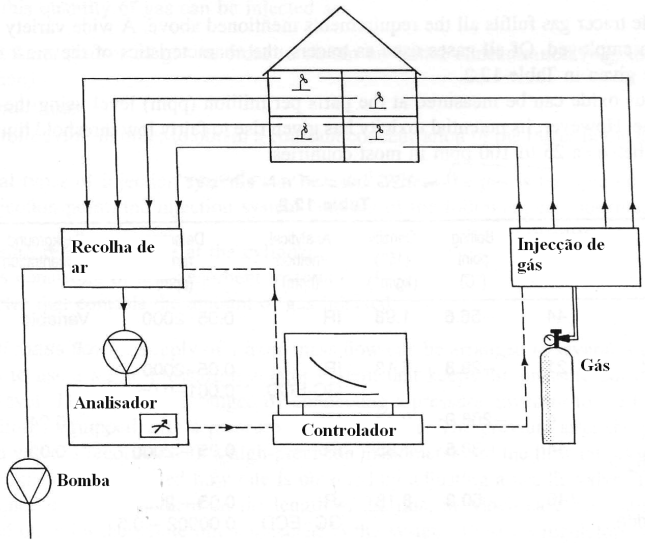


Figura 4.3 - Equipamento tipo usado no método do gás traçador (adaptado de [4.6]).

A técnica do declive pode ser aplicada, sem problemas, em edifícios com uma renovação horária até 10 h^{-1} [4.8].

Aplicação internacional e em Portugal

A nível internacional, esta técnica encontra-se profundamente difundida devido à facilidade de aplicação [4.15], [4.17], [4.18], [4.19], bem como em Portugal ([4.20] a [4.25]).

Procedimento de medição

Para determinar a evolução da concentração de um gás num espaço, frequentemente, recorre-se a um dispositivo de medição baseado no princípio da medição fotoacústica. Este dispositivo foi usado no âmbito da presente tese em todas as técnicas do gás traçador à excepção da técnica PFT.

O sistema de medição funciona através do princípio da espectroscopia fotoacústica de radiação infravermelha. Neste método, uma amostra de ar é recolhida e posteriormente retida numa câmara fechada que é iluminada por um feixe de radiação infravermelha pulsada que passou através de um filtro óptico numa banda estreita do espectro. Esta irradiação reflecte-se num aumento da amplitude das flutuações de pressão no interior da câmara que é proporcional à concentração do componente (quando este componente absorve a radiação na mesma banda), ou seja, as moléculas do componente analisado absorvem energia e aumentam a agitação molecular e a respectiva temperatura. Estas flutuações de temperatura provocam flutuações de pressão que são medidas por meio de dois microfones de alta exactidão, colocados em paredes opostas na câmara [4.26].

Como este método é de elevada sensibilidade, pode-se obter a concentração de gases com um nível bastante elevado de fiabilidade. Na Figura 4.4 é apresentado esquematicamente o princípio de funcionamento anteriormente descrito.

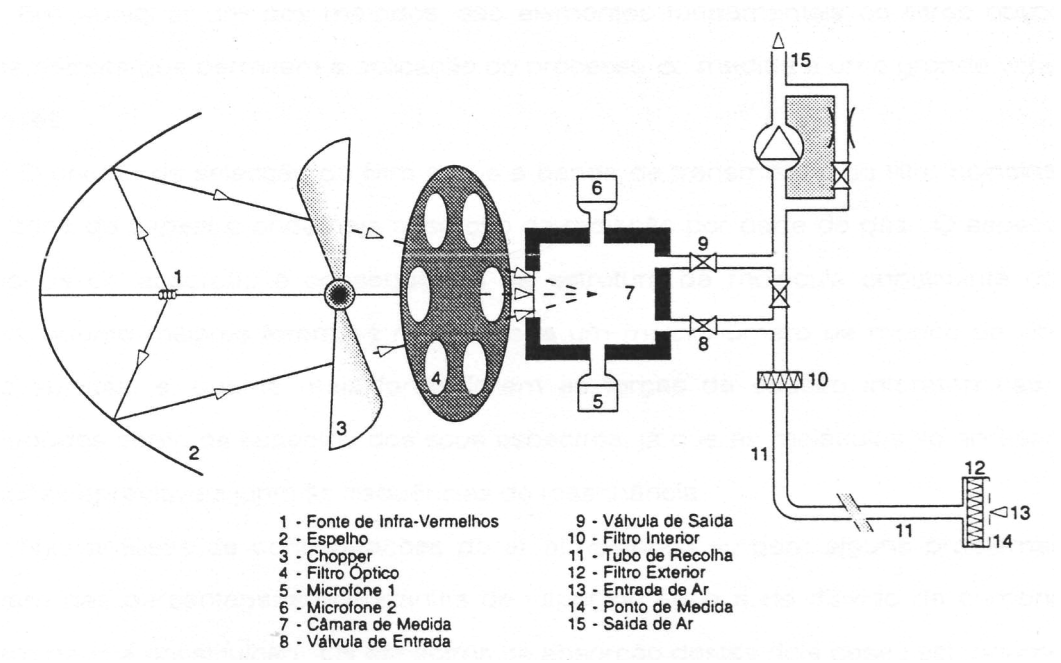


Figura 4.4 - Representação esquemática do princípio de funcionamento do analisador de gases [4.27].

Exactidão e incerteza[2]

Tendo em conta que a equação (4.5) se aplica ao volume efectivo da zona (espaço ventilado), o cálculo dos caudais de renovação depende da estimativa daquele (é necessário retirar mobília, equipamentos, etc.), sendo este cálculo uma das fontes principais da incerteza da técnica. Alternativamente, quando possível, poderão abrir-se os armários ou arrumos e assim estes volumes, inicialmente encerrados, deverão ser ventilados [4.6].

Outras fontes de erro são a não uniformidade da concentração inicial e a deriva do analisador (variação da exactidão com o tempo) [4.9].

A exactidão da técnica do declive é da ordem de 11 ± 6 % relativamente à constante de tempo nominal, τ_n, ou à renovação horária, *RPH* (para um edifício monozona), quando respeitados os critérios já expostos relativamente à colocação dos ventiladores [4.13]. Relativamente ao caudal exterior, a exactidão da técnica é de cerca de 12% (edifício monozona), recorrendo ao uso de ventiladores [4.12].

[2] O termo incerteza traduz uma exactidão associada a um intervalo de confiança.

Valores da incerteza no cálculo da renovação horária ou do caudal exterior da ordem de 10%, para um intervalo de confiança de 95%, podem também ser encontrados em normalização recente [4.9], [4.15].

4.2.4. TÉCNICA DA EMISSÃO CONSTANTE

Princípio

Assumindo as mesmas hipóteses anteriormente apresentadas para a técnica do declive, na técnica da emissão constante a concentração, numa zona, é definida pela seguinte equação:

$$c(t) = -c_{\infty} e^{-(q/V)t} + \frac{s}{q} \tag{4.7}$$

em que:

- c_{∞}: concentração de equilíbrio (final) do gás traçador, em volume [-].
- q: caudal volúmico de ar exterior [m^3/s];
- V: volume efectivo da zona [m^3];
- s: caudal volúmico de gás injectado [m^3/s].

A evolução da concentração efectua-se em duas fases (Figura 4.5). Na primeira fase regista-se o crescimento exponencial da concentração do gás traçador. A segunda fase inicia-se quando se atinge uma concentração de equilíbrio - c_{∞}. O tempo requerido para se atingir a concentração de equilíbrio é função das renovações horárias (*RPH*).

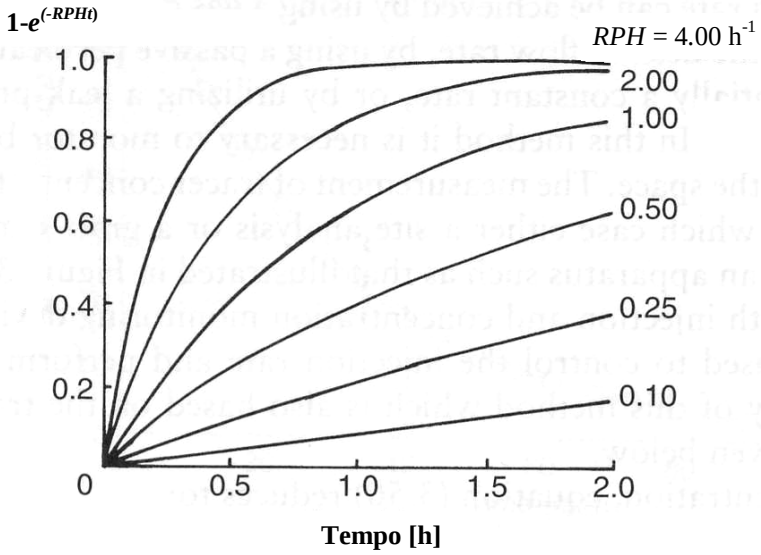


Figura 4.5 - Tempo para se atingir uma concentração de equilíbrio em função do número de renovações horárias (adaptado de [4.1]).

Obtida uma concentração de equilíbrio, o caudal de ar exterior é dado por:

$$q = \frac{s}{\overline{c_\infty}} \tag{4.8}$$

em que $\overline{c_\infty}$ representa a média temporal da concentração de equilíbrio do gás na zona em estudo. Esta pode ser calculada do seguinte modo [4.28]:

$$\overline{c_\infty} = \frac{\sum_{i=1}^{n} c_i}{n} \tag{4.9}$$

em que n representa o número de registos temporalmente distintos. Pode usar-se também uma média harmónica [4.15].

Em edifícios monozona aplica-se o critério de uniformidade da concentração referido no ponto anterior [4.9], [4.15].

Uma vez que a concentração de equilíbrio, c_∞, deve estar dentro dos limites do analisador e também não deve ultrapassar o limite de exposição humana ao gás traçador (Quadro 4.2), é necessário o cálculo do caudal de gás a injectar, este é dado por [4.9]:

$$s = c_\infty VRPH_{\text{estimada}} \tag{4.10}$$

em que RPH_{estimada} é a renovação horária estimada no espaço em estudo.

Procedimentos e normalização

Tendo por base a análise da bibliografia [4.29] e normalização existente para este ensaio [4.9], [4.15], [4.28] podem-se apresentar alguns procedimentos aconselhados para esta técnica:

- registar no mínimo cinco valores;
- as leituras devem começar aproximadamente entre $3 \cdot \tau_n$ a $5 \cdot \tau_n$ (ver Figura 4.5) e espaçadas de 5 a 10 minutos.

A emissão de gás traçador deve-se realizar nos compartimentos com maior entrada de ar e a recolha nos compartimentos com maior saída de ar [4.6], [4.28]. Quando a entrada e a saída não são bem definidas, caso da ventilação natural, a emissão deve ser realizada em local central e a recolha em todos os compartimentos (neste caso, a concentração será obtida por uma média pesada pelo volume).

Aplicação internacional e em Portugal

A nível internacional esta técnica não tem merecido grande aplicação, à excepção de aplicações em laboratório [4.29]. Em Portugal, encontrou-se somente uma referência bibliográfica onde a técnica foi aplicada ao cálculo do caudal escoado por uma chaminé solar [4.30].

Exactidão e incerteza

A fonte fundamental de erro desta técnica é a incorrecta determinação da quantidade de gás injectado [4.9].

O erro proveniente de uma concentração não uniforme é de cerca de 5 a 7% e o erro originado por um caudal variável é de aproximadamente 7%, o que perfaz uma exactidão da técnica, com o uso de ventiladores, de cerca de 9% do caudal de ar exterior (edifício monozona) [4.28].

Valores da incerteza no cálculo da renovação horária ou do caudal exterior da ordem de 10%, para um intervalo de confiança de 95%, podem também ser encontrados em normalização recente [4.9], [4.15].

4.2.5. TÉCNICA PFT

Qualquer sistema que incorpore uma emissão constante de gás e uma medição da média temporal da concentração é inserido na categoria das técnicas passivas de medição da ventilação [4.31].

Durante os últimos anos, a técnica do gás traçador passivo tem-se tornado bastante difundida internacionalmente, devido principalmente ao reduzido sistema experimental *in situ* e também devido ao facto de ser possível efectuar os ensaios em edifícios ocupados e em períodos alargados de tempo.

Esta técnica, a qual é denominada frequentemente por PFT devido ao tipo de gás usualmente empregue (Perfluorocarbon Tracer), foi criada nos Estados Unidos da América (EUA) [4.32] e posteriormente aplicada e desenvolvida em várias instituições europeias [4.33], [4.34], [4.35] e japonesas [4.36].

Princípio e vantagens da técnica

A técnica do gás traçador passivo é uma variante da técnica da emissão constante e consiste na emissão contínua e passiva do gás traçador, por exemplo, Perfluorobenzeno (C_6F_6 - PB) ou Perfluorometilbenzeno (C_7F_8 - PMB), através de cápsulas emissoras [4.37].

O uso deste tipo de gases deve-se ao facto de apresentarem as seguintes propriedades [4.6], [4.37]:

- terem adsorção negligenciável pelos materiais normalmente existentes nos edifícios;
- não terem risco para a saúde dentro dos limites usados;
- serem voláteis à temperatura ambiente;
- serem detectáveis a concentrações muito baixas;
- possuírem baixas concentrações no ar interior.

O gás contido nas cápsulas emissoras está na fase líquida e é disperso no ar ambiente, após evaporação, através da passagem por uma membrana [4.32], [4.37] ou através da difusão por um tubo capilar [4.38], [4.39]. Mais recentemente, o gás é disperso no ar ambiente através da difusão por um tubo capilar recorrendo à inserção de um fio metálico neste [4.40], [4.41], o que permite uma emissão ajustável.

Esta última técnica permite uma emissão proporcional ao volume da zona a estudar - técnica da emissão homogénea [4.40]. Neste caso, o gás traçador, na forma líquida, está contido num pequeno tubo de alumínio. O composto vaporiza, a uma taxa variável em função da temperatura, e difunde ao longo de um tubo capilar de 40 mm. A taxa de emissão pode ser ajustada através da inserção, com diferentes profundidades, de um fio metálico no tubo capilar, com o objectivo de bloquear parte da área de difusão, permitindo ajustar proporcionalmente a emissão ao volume da zona na qual a cápsula vai ser instalada. A Figura 4.6 mostra a emissão relativa em função do comprimento de penetração do fio. Esta relação foi verificada experimentalmente [4.42] e permite uma taxa de emissão variável entre 1 e 2×10^{-5} g/h [4.43].

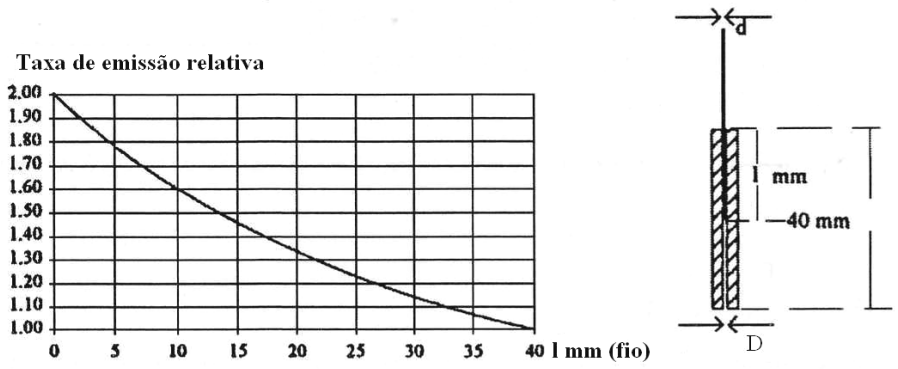


Figura 4.6 - Ajustamento da emissão relativa numa cápsula emissora (adaptado de [4.42]).

O princípio em que se baseia a técnica da emissão homogénea consiste na divisão do objecto a medir em várias zonas e a injecção contínua do gás traçador em cada zona com uma taxa proporcional ao volume das mesmas. Assim, em condições estacionárias (após a obtenção de uma concentração de equilíbrio) a concentração local é proporcional à idade média local do ar [4.40].

A idade média do ar num determinado ponto é o tempo que, em média, o ar que circunda esse ponto, demorou desde a entrada no compartimento até ao ponto em estudo. Está relacionada com o tempo requerido para trocar o “ar velho” por “ar novo” vindo do exterior. Espaços bem ventilados têm idades médias do ar pequenas, enquanto que espaços mal ventilados têm valores mais elevados.

Sendo assim, a idade média do ar num determinado ponto é dada por:

$$\tau_p = \frac{c_p}{(s/V)} \tag{4.11}$$

em que:

- τ_p: idade média do ar num determinado ponto [h];
- c_p: concentração local do gás traçador [g/m^3];
- s/V: taxa de emissão homogénea, proporcional ao volume, do gás traçador [g/h·m^3].

A concentração do gás traçador num determinado ponto é dada por:

$$c_{\mathrm{p}} = \frac{M_{\mathrm{p}}}{\kappa t} \tag{4.12}$$

em que:

- M_{p}: quantidade de gás traçador recolhida nas cápsulas receptoras [g];
- κ: taxa de recolha [m^3/h];
- t: tempo de ensaio [h].

Se a mistura ar-gás traçador é uniforme em cada zona - concentração igual em todos os pontos - , então a concentração local é assumida como sendo igual à da zona.

Por fim, quando a extracção ocorre pelos dispositivos pré-instalados e pela permeabilidade da envolvente (pontos de extracção não são totalmente identificáveis), a idade média do ar de um edifício com *n* zonas é obtida da seguinte forma [4.41]:

$$\tau = \frac{\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} V_i \tau_{\mathrm{i}}}{\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} V_{\mathrm{i}}} \tag{4.13}$$

em que V_{i} e τ_{i} são, respectivamente, o volume [m^3] e a idade média [h] do ar em cada zona do edifício.

Uma vez que a renovação horária obtida com a equação (4.2) se refere à renovação horária global do edifício, localmente não se pode definir *RPH*. Neste caso, pode apresentar-se uma terminologia alternativa [4.41]:

- taxa de ventilação específica - *RPH* (Specific ventilation flow rate = Air change rate - *ACH*) [h^{-1}];

- taxa local de ventilação específica - RPH_{local} (Room-specific ventilation flow rate = ACH_{local}) [h^{-1}].

As vantagens da técnica da emissão homogénea [4.41], em relação à técnica da emissão constante (*standard*) [4.39], têm a ver com o facto de que a primeira permite o cálculo local da idade média (τ_p) e da renovação horária (RPH_{local}), enquanto que a segunda fornece somente os caudais em jogo.

Outra das vantagens desta técnica é o facto de ser insensível a problemas relacionados com o volume efectivo, reduzindo-se assim a incerteza da técnica [4.44].

Procedimentos e normalização

A colocação das cápsulas emissoras tem por objectivo "marcar" todo o ar antes de este deixar o espaço. Os seguintes princípios devem ser seguidos [4.39], [4.41]:

- colocar no mínimo uma cápsula em cada compartimento com entrada directa de ar exterior. Isto exclui, normalmente, compartimentos somente com saída de ar;
- calcular o número de cápsulas com base nas taxas de admissão de ar exterior (normalmente proporcional à área do compartimento), ou, no caso da emissão homogénea, tendo em conta o volume da zona;
- posicionar as cápsulas na proximidade (0,5-1,0 m) das paredes exteriores ou dos elementos de insuflação de ar, mas afastadas de superfícies frias ou quentes e da radiação solar directa (é necessário conhecer a temperatura média do edifício, uma vez que a taxa de emissão é sensível a esta).

Após a difusão molecular do gás na zona/edifício, a recolha é realizada passivamente, por difusão capilar, através de cápsulas receptoras contendo um adsorvente (carvão poroso).

Na Figura 4.7 apresenta-se um exemplo de uma cápsula receptora.

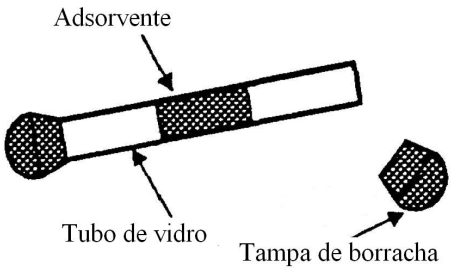


Figura 4.7 - Exemplo de uma cápsula receptora (adaptado de [4.39]).

A colocação das cápsulas receptoras tem por objectivo recolher uma amostra representativa do ar que sai do espaço. No caso de um número limitado de locais de extracção, colocam-se as cápsulas receptoras junto a estes. No caso de não se conhecer o número de extracções, ou o seu local, como no caso da ventilação natural, as cápsulas receptoras devem ser colocadas no centro dos compartimentos. Os seguintes princípios devem ser seguidos [4.39], [4.41]:

- colocar uma cápsula em cada local de extracção, com o mínimo de três por ensaio. No caso da emissão homogénea, as cápsulas colocam-se nos locais onde se pretende obter a idade média do ar;
- colocar as cápsulas na proximidade das extracções ou, se estas não são conhecidas, ou se o número destas é menor que três, na proximidade do centro do espaço ocupado;
- a distância entre uma cápsula emissora e uma receptora deve ser no mínimo de 1 m.

As cápsulas receptoras devem cumprir os seguintes requisitos [4.39], [4.41]:

- reprodutibilidade da produção melhor que 5%;
- taxa de recolha independente da concentração do gás e constante para as concentrações, temperaturas dos compartimentos e velocidades do ar normalmente existentes nos locais a medir.

As taxas de recolha para os gases PB e PMB (ver Quadro 4.2) são de, respectivamente, 18×10^{-6} m^3/h e 16×10^{-6} m^3/h [4.37], [4.45].

Exemplifica-se na Figura 4.8 a colocação de cápsulas emissoras e receptoras para o caso de uma moradia.

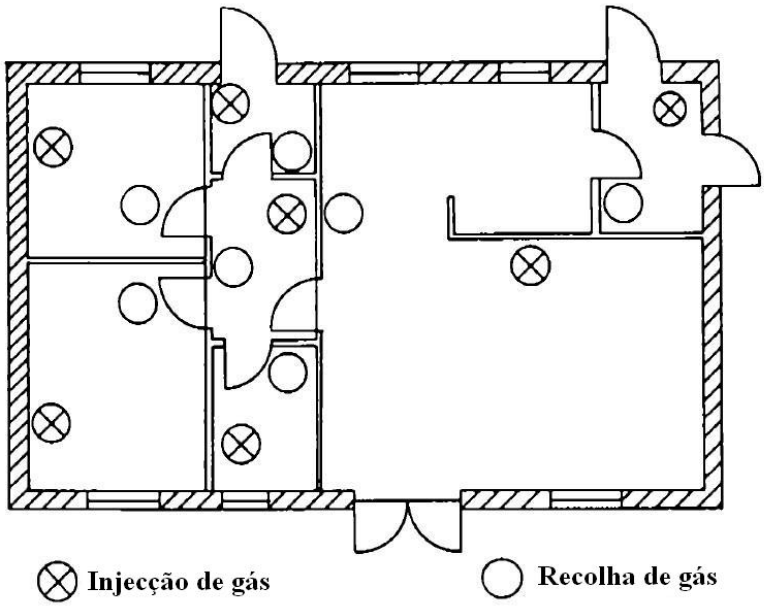


Figura 4.8 - Exemplo de colocação de cápsulas emissoras e receptoras para o caso de uma moradia (adaptado de [4.2]).

Concluído o ensaio, é necessário medir a quantidade de gás traçador recolhido nas cápsulas receptoras. Um sistema de análise adequado, baseado na separação operada por cromatografia gasosa (a fase móvel é um gás), deve ser composto por [4.39]:

- unidade de desadsorção, que tanto pode ser baseada na desadsorção térmica como na extracção liquida;
- pré-coluna, a qual é usada para retirar os compostos pesados (menos voláteis) da amostra;
- coluna principal, a qual é usada para separar os gases traçadores;
- sistema de recirculação de lavagem (back-flush system), o qual é usado para eliminar os compostos pesados da pré-coluna;
- um detector de captura de electrões, o qual mede a quantidade de gases traçadores na amostra.

Numa primeira fase, o adsorvente contido nas cápsulas (carvão poroso) é misturado com 1 ml de tolueno purificado. Em seguida, uma parte da solução de tolueno (1 μl) é injectada para o cromatógrafo com o objectivo de separar os vários gases da amostra. Os gases são separados, recorrendo a um gás de arrasto (Hélio), de acordo com a afinidade com a fase estacionária líquida (o revestimento da coluna capilar é um líquido à temperatura de ensaio). Assim, gases com maior afinidade migram a uma velocidade mais baixa que os gases com menor afinidade.

Numa segunda fase, quantifica-se o gás traçador na amostra que é realizada por um detector de captura de electrões. Neste detector, um cátodo de níquel radioactivo emite electrões, de forma a manter uma corrente contínua constante, os quais são recebidos pelo ânodo de platina. Os gases capturam estes electrões, baixando a corrente eléctrica recebida pelo ânodo. Este abaixamento leva a aumentar a frequência de emissão de electrões e esta é proporcional à quantidade de gás na amostra [4.2], [4.33], [4.37].

Na Figura 4.9 apresenta-se o princípio de análise da quantidade de gás recolhida nas cápsulas receptoras (M_p).

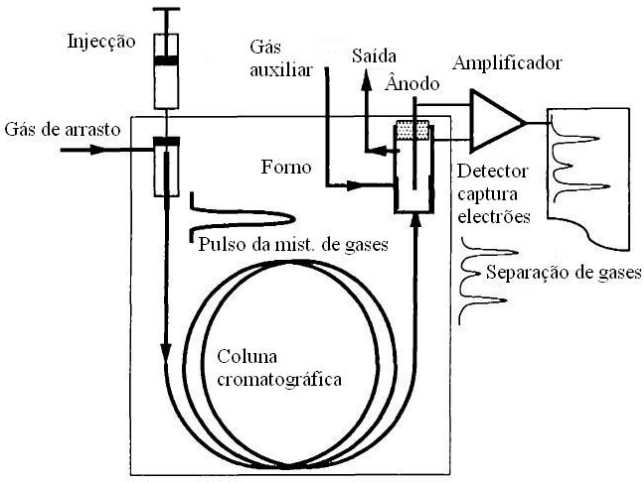


Figura 4.9 - Princípio da cromatografia gasosa com um detector de captura de electrões (adaptado de [4.2]).

O sistema de análise deve obedecer aos seguintes requisitos [4.39], [4.41]:

- reprodutibilidade melhor que 5%;

- exactidão da calibração melhor que 5%;
- a eventual deriva do sistema de análise deve ser tida em conta, por exemplo, usando cápsulas de referência a intervalos regulares.

Aplicação internacional e em Portugal

Como referido anteriormente, a técnica da emissão constante, no caso em estudo PFT, permite estudos com intervalos de tempo prolongados, à semelhança da técnica da concentração constante, mas apresenta uma grande vantagem em relação a esta, o dispositivo experimental *in situ* é muito mais simples. Tendo em conta as razões apresentadas, a nível internacional, principalmente nos países nórdicos, tem havido um largo uso desta técnica. No Quadro 4.4 apresenta-se uma análise comparativa de alguns dos estudos mais significativos utilizando esta técnica.

Quadro 4.4 - Estudos internacionais recorrendo à técnica PFT [4.46].

	Países (ano)			
	Dinamarca (1991)	Finlândia (1992)	Suécia (1994)	Noruega (1998)
Casos de estudo	123	242	1143	344
Período de medição	1-2 semanas	2 semanas	1 mês	2 semanas

Realizou-se recentemente um estudo tendo como objectivo correlacionar os parâmetros climáticos (vento e temperatura) e as renovações horárias (*RPH*). Não se encontrou a correlação esperada, admitindo-se que a influência do comportamento dos ocupantes se sobrepõe à influência dos parâmetros climáticos [4.47].

Em Portugal, o primeiro ensaio recorrendo a esta técnica foi realizado, no âmbito desta tese, em 2003 [4.48], [4.49].

Incerteza e subestimação

A incerteza da idade média local, utilizando a técnica da emissão homogénea, é dada por [4.41]:

$$s = \sqrt{s_{\text{emissão}}^2 + s_{\text{recolha}}^2 + s_{\text{análise}}^2 + s_{\text{homogeneização}}^2} \tag{4.14}$$

em que:

- s: incerteza relativa total;
- $s_{\text{emissão}}$: incerteza relativa referente à emissão do gás traçador;
- s_{recolha}: incerteza relativa referente à recolha do gás traçador;
- $s_{\text{análise}}$: incerteza relativa referente à análise do gás traçador (reprodutibilidade + deriva + incerteza da calibração[3]);
- $s_{\text{homogeneização}}$: incerteza relativa referente a qualquer desvio da emissão homogénea que possa ocorrer no edifício (normalmente, o desvio é desprezado).

A incerteza na determinação da idade média de um edifício diminui com o aumento do número de cápsulas emissoras e receptoras. Para um exemplo com 12 zonas, 22 cápsulas emissoras e 60 cápsulas receptoras, a incerteza na determinação da idade média local variou entre 5,5% e 10% e a incerteza da idade média do edifício foi somente 1,8% [4.40].

A técnica PFT integra a concentração ao longo de um período de tempo, $\frac{1}{\bar{c}}$, e uma vez que $\frac{1}{\bar{c}} \leq \overline{\left(\frac{1}{c}\right)}$, esta técnica dá origem a uma subestimação do caudal médio (ver equações (4.1) e (4.11); subestimação máxima de 6% [4.28]). A subestimação depende essencialmente da amplitude e período da renovação horária [4.28], [4.50].

Grande parte da campanha experimental realizada no âmbito desta tese recorreu à técnica PFT (emissão homogénea), estabelecendo-se um protocolo de cooperação com o Centre for Built Environment, Laboratory of Ventilation and Air Quality, University of Gävle (Suécia), no sentido de se aprofundarem conhecimentos sobre a mesma, e com a PENTIAQ AB, fornecedora dos dispositivos de ensaio e posterior análise dos mesmos.

[3] 3% é o valor típico.

4.2.6. TÉCNICA DA CONCENTRAÇÃO CONSTANTE

Princípio

Conceptualmente, esta é a técnica mais simples, mas a sua aplicação requer equipamento (hardware e software) específico. A técnica baseia-se na manutenção de uma concentração constante, $c_{\text{objecto,}}$ na zona em estudo durante todo o período de ensaio, isto é:

$$q = \frac{\bar{s}}{c_{\text{objecto}}} \tag{4.15}$$

À primeira vista, a equação (4.8) aparenta ser igual à equação (4.15), no entanto, a diferença entre elas reside no facto de que, na segunda equação, a concentração constante é mantida através da variação da taxa de injecção de gás, enquanto que na primeira é usada uma taxa de injecção constante. Na equação (4.15), o caudal de ar exterior é directamente proporcional à taxa de injecção de gás requerida para manter uma dada concentração - c_{objecto}.

Procedimentos e normalização

A implementação desta técnica requer um algoritmo que possa controlar a taxa de injecção de gás, *s*, de modo a manter uma concentração constante numa dada zona. Normalmente, é usado um controlador PID (Proporcional-Integral-Diferencial). Isto requer uma recolha periódica e sequencial, no caso de um edifício multi-zona, e posterior análise e cálculo da taxa de injecção para manter a concentração desejada. No caso de um sistema de controlo totalmente automatizado, este pode ser programado para trabalhar e armazenar dados durante um período alargado de tempo (ex.: 100 horas), permitindo calcular continuamente o caudal de ar exterior “instantâneo” em cada zona.

Em edifícios monozona aplica-se o critério de uniformidade da concentração referido nos pontos anteriores [4.9], [4.15].

Aplicação da técnica da concentração constante e análise comparativa entre as diversas técnicas

Em Portugal, esta técnica não tem sido utilizada. A nível internacional, tem sido aplicada com alguma frequência [4.13], [4.51], [4.52], mas não tanto como as técnicas do declive ou PFT, devido à complexidade do equipamento a usar.

Foi realizada a comparação da técnica da concentração constante com a técnica PFT em dois ensaios numa casa desocupada e oito ensaios numa casa ocupada [4.53]. Concluiu-se que, para a casa desocupada, não existiram grandes discrepâncias entre as duas técnicas, ao passo que, para a casa ocupada, devido à abertura de janelas para ventilação, principalmente no Verão, a técnica PFT apresentava sistematicamente valores inferiores nas renovações horárias. A explicação tem a ver com o facto de que a técnica PFT calcular o inverso da média da concentração, senda esta sempre menor que a média do inverso, conforme apresentado no §4.2.5.

A comparação entre a técnica da concentração constante e a técnica do declive foi realizada envolvendo um escritório e dois apartamentos [4.54]. Concluiu-se que a técnica do declive apresentava valores superiores nas renovações horárias (entre 10 a 16%), admitindo-se que estes valores superiores se justificam pelo facto de que os experimentadores induziram fluxos adicionais.

Também foi realizada uma comparação entre todas as técnicas anteriormente apresentadas - técnicas do declive, emissão (activa/passiva) constante e concentração constante [4.55] - , concluindo-se que dão resultados comparáveis em relação à obtenção da renovação horária global para uma zona.

Exactidão, incerteza e vantagens da técnica

Algumas fontes de erro desta técnica são a incorrecta determinação da quantidade de gás injectado e o inadequado sistema de controlo da concentração [4.9].

A técnica da concentração constante apresenta como vantagens a obtenção de um caudal total exterior com grande exactidão e também a obtenção do caudal exterior que entra em

cada zona, bem como a respectiva variação temporal. A exactidão é de aproximadamente 6 ± 3 %, em relação ao caudal nominal total exterior [4.13].

Valores da incerteza no cálculo do caudal exterior da ordem de 10%, para um intervalo de confiança de 95%, podem também ser encontrados em normalização recente [4.9], [4.15].

4.2.7. ANÁLISE COMPARATIVA - SELECÇÃO DE UMA TÉCNICA DE MEDIDA

O método do gás traçador é o único que pode ser usado para medir a distribuição dos fluxos de ar pelos espaços dos edifícios em sistemas que recorrem a ventilação natural, com infiltrações e exfiltrações. No entanto, as técnicas utilizadas fazem uso de certas hipóteses e estas têm que ser validadas e confirmadas para assegurar confiança nos resultados. A maior assunção diz respeito ao requisito de concentração homogénea (ou uniforme) do gás traçador numa determinada zona [4.2].

Para o caso de uma zona e dependendo da variável desejada (*q* ou *RPH*), da estabilidade dos fluxos e das limitações experimentais (ex.: compartimentos ocupados ou desocupados), várias opções podem ser feitas.

A técnica do declive requer o menor tempo e, normalmente, a menor preparação. No entanto, apresenta a desvantagem de calcular resultados pontuais e, se os fluxos não forem constantes, apresenta resultados com pouca exactidão. A técnica passiva de medição, tipo PFT, apresenta facilidades de instalação, bem como permite a ocupação dos espaços. Contudo, apresenta, normalmente, resultados subestimados em relação ao valor real das renovações horárias (quando o sistema de ventilação depende das condições atmosféricas). A técnica da concentração constante é a que apresenta menor incerteza nos resultados, tendo como desvantagem o investimento em equipamento e no algoritmo de controlo, não permitindo a ocupação dos espaços, devido à obstrução provocada pelo equipamento. Apresenta-se no Quadro 4.5 um resumo das variáveis que poderão afectar a selecção de uma técnica para o caso do cálculo das renovações horárias ou do caudal de ar exterior.

Quadro 4.5 - Técnicas para a determinação das renovações horárias ou do caudal de ar exterior (adaptado de [4.2]).

Técnica	Equipamento	Quantidades medidas	Factores que afectam a selecção
Declive (T1)	Equipamento de emissão de gás Ventiladores Sistema de recolha do gás Analisador de gás Sistema de aquisição de dados	Concentração do gás *versus* tempo Volume da zona	Fornece parâmetros médios de ventilação durante o período de medição
Emissão constante (T3)	Equipamento usado na técnica do declive + equipamento de controlo da emissão constante	Concentração do gás *versus* tempo Volume da zona Caudal do gás	Permite a estimativa de *RPH* variável
Concentração constante (T6)	Equipamento usado na técnica do declive + sistema de controlo da emissão, computador e software	Concentração do gás *versus* tempo Volume da zona Caudal do gás	Permite o registo contínuo de fluxos variáveis Permite a combinação de várias zonas Custo elevado

A determinação dos fluxos interzonas é morosa e envolve equipamento sofisticado pelo que não foi usada na presente tese.

Uma vez que os ensaios apresentados em §6 envolviam a determinação simultânea das renovações horárias em vários apartamentos, nas diversas campanhas experimentais recorreu-se ao uso da técnica PFT (com período de medição de uma semana). Pontualmente, devido à rapidez da técnica, usou-se também a técnica do declive, permitindo a realização de vários ensaios no mesmo apartamento.

4.3. MÉTODO DE PRESSURIZAÇÃO

Princípio

Este método consiste simplesmente na imposição de diferenciais de pressão conhecidos entre os dois lados de uma frincha ou elemento construtivo, medindo os caudais e estabelecendo uma correlação (q, Δp) entre os resultados obtidos.

A quantificação das infiltrações através das frinchas é tarefa difícil se não impossível, pois é difícil identificar e caracterizar todas as frinchas existentes na envolvente de um edifício. Quando muito, só será possível ter em conta as frinchas mais óbvias, por exemplo, as

existentes nas caixilharias e portas, bem como outras aberturas de maiores dimensões eventualmente existentes na envolvente. De modo a ultrapassar esta dificuldade, correntemente, ensaiam-se elementos construtivos (ex.: janela ou porta), *in situ* [4.56] ou em laboratório [4.57], [4.58]. Em Portugal, a permeabilidade de janelas, portas e grelhas auto-reguláveis, tem sido raramente objecto de ensaio, à excepção das caixilharias, [4.59] a [4.62].

Existem vários métodos quantitativos para avaliar a permeabilidade de componentes [4.2]. O mais simples recorre somente ao uso de um ventilador, é designado por método indirecto e consiste essencialmente em obter a diferença de caudal entre duas situações distintas. No caso da determinação da permeabilidade de uma janela *in situ*, esta é obtida pela diferença entre uma situação inicial em que o compartimento é pressurizado (as janelas e portas dos compartimentos adjacentes ficarão abertas) e uma segunda situação em que a janela é vedada (selagem de todas as juntas).

Considerando um edifício na sua globalidade, é possível estimar directamente a área total das frinchas e a respectiva permeabilidade. O ensaio é realizado de um modo semelhante ao anteriormente descrito, com a particularidade de que uma das portas do edifício é substituída por uma outra de dimensão variável, dotada de um ventilador reversível cujas características (q, Δp) devem ser previamente conhecidas. Tendo em conta o exposto, este ensaio é conhecido por ensaio da “porta-ventiladora” (Figura 4.10).

Este ensaio pode ser usado para localizar e reparar as frinchas da envolvente, comparar a permeabilidade ao ar entre edifícios ou para verificar a eficiência da reabilitação da envolvente (comparando os valores das infiltrações antes e após a reabilitação), mas, actualmente, é mais usado para, a partir dos valores obtidos das infiltrações, realizar estimativas do consumo de energia e da qualidade do ar interior. Estas estimativas podem ser usadas para comparar normas ou para fundamentar programas ou políticas energéticas ou da qualidade do ar (actualmente, alguns países possuem normalização que impõe limites superiores à permeabilidade de edifícios). Outra aplicação do método é a previsão de valores médios da taxa de infiltração (*RPH*).

Figura 4.10 - Exemplo de porta-ventiladora.

O princípio de medição pode ser observado na Figura 4.11.

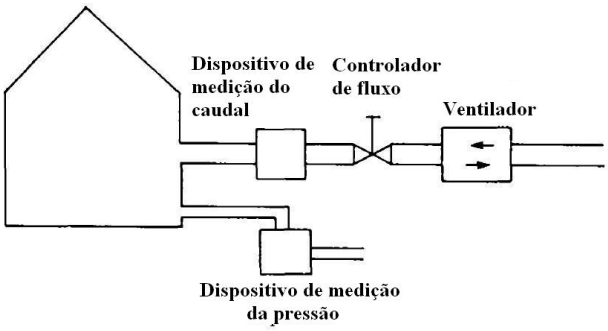


Figura 4.11 - Esquema do princípio do método da porta-ventiladora (adaptado de [4.2]).

O ventilador quando em funcionamento cria uma sobrepressão, ou uma depressão, no interior do edifício, sendo então possível obter curvas (em escala linear) do tipo das que se mostram na Figura 4.12.

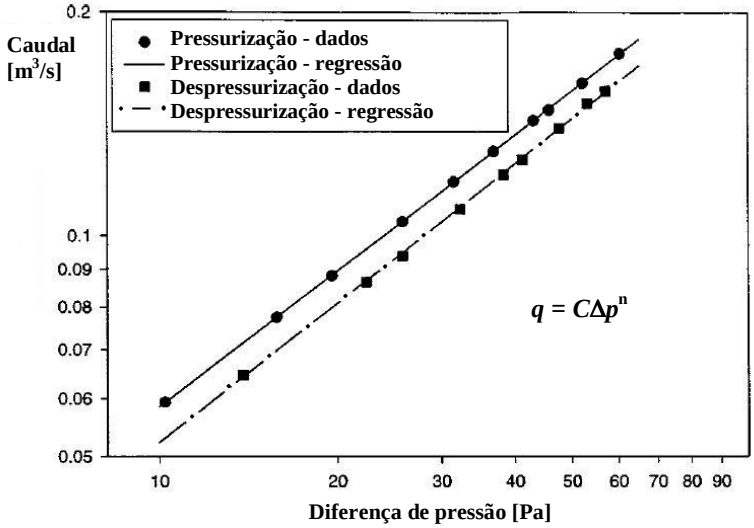


Figura 4.12 - Exemplo de gráfico de permeabilidade ao ar (adaptado de [4.63]).

Como se pode constatar, as duas curvas (pressurização e despressurização) são distintas. Isto deve-se ao comportamento diferente de certas frinchas, que, conforme a pressão é aplicada de um ou de outro lado, são comprimidas ou descomprimidas, tendendo então a contrair-se ou expandir-se.

Os coeficientes das curvas da Figura 4.12 (*C* e *n*) de vários componentes (ex.: janelas, portas, paredes, pavimentos, tectos, juntas entre elementos e chaminés), bem como a apresentação da normalização ou regulamentação existente a nível internacional podem ser encontrados em bibliografia especializada [4.64], [4.65].

Como já referido, este método também permite a previsão de valores médios da taxa de infiltração (*RPH*). É necessária em primeiro lugar uma caracterização do clima local médio em termos de vento e temperatura, posteriormente, admite-se, habitualmente, que [4.22]:

$$RPH_{\text{média anual}} = \frac{RPH_{50}}{N} \tag{4.16}$$

em que:

- $RPH_{\text{média anual}}$: renovação horária média anual [h^{-1}];

- RPH_{50}: renovação horária obtida através do ensaio de pressurização a 50 Pa;
- N: constante que depende, nomeadamente, do clima local, do tipo de edifício e da implantação do edifício.

Procedimentos e normalização

Normalmente, o intervalo de medição situa-se entre os 10 e os 60 Pa, com incrementos entre 5 e 10 Pa e com medição no mínimo de 5 pontos [4.63], [4.66]. Não se medem caudais para diferenças de pressão inferiores a 10 Pa de forma a minimizar a influência criada pelo vento e pelo diferencial térmico aquando da realização dos ensaios (para condições climáticas normais, a pressão induzida pelo efeito combinado das diferenças de temperatura e do vento anda na gama de ± 10 Pa) [4.2]. Também se recomenda a abertura das janelas e portas dos apartamentos adjacentes [4.67].

Como já referido, os ensaios sofrem a influência das condições atmosféricas exteriores. Sendo assim, só se deve levar a efeito este tipo de ensaio quando o produto da diferença de temperatura entre o exterior e o interior pela altura do edifício for menor ou igual que 200 m·ºC [4.63] ou menor que 500 m·K [4.66] (os critérios de ensaio variam consoante a norma). As condições preferenciais de ensaio devem ser tais que a velocidade do vento se situe entre 0 e 2 m/s e a temperatura exterior se situe entre 5 e 35ºC [4.63].

Aplicação internacional e em Portugal

Internacionalmente, obteve-se para uma amostra significativa de habitações um valor médio de n igual a 0,66 ($q = C\Delta p^n$), significando que, em termos médios, a envolvente apresenta permeabilidade através de orifícios com dimensões típicas maiores que 10 mm (ver §3.2) [4.68].

A nível da Europa [4.69], [4.70], o estudo, respectivamente, de 51 habitações na Bélgica e 68 habitações em França, permitiu concluir que a permeabilidade depende fortemente do tipo de edifício. Assim, em média, habitações em banda são menos permeáveis que habitações geminadas ou isoladas, mas mais permeáveis que apartamentos.

Em Portugal [4.22], obteve-se uma correlação para 12 moradias entre N e RPH_{50} (ver equação (4.16)). Encontrou-se um valor médio de $N = 13{,}7$, concluindo-se que o desvio médio entre as renovações horárias obtidas pelo método do gás traçador e as renovações horárias previstas pelo modelo era somente de 0,138 h^{-1}.

Também em Portugal, a permeabilidade de edifícios de habitação foi estudada essencialmente em dois estudos, [4.16] e [4.22], com o ensaio de, respectivamente, 7 e 12 habitações. Posteriormente, acrescentaram-se mais 4 estudos, o que resultou em valores de RPH_{50} a variar entre 2 a 8, sendo classificados na classe média de permeabilidade, segundo normalização europeia recentemente publicada [4.62].

Relativamente aos componentes, em ensaio experimental recente realizado em Portugal envolvendo quatro edifícios [4.62], verificou-se que a permeabilidade da caixilharia apresenta um valor relativamente baixo, quando comparada com a da caixa de estores.

Incerteza

Para equipamentos correntes, a incerteza na determinação dos vários parâmetros que se podem obter com este ensaio situa-se, na maior parte dos casos, abaixo de 15% [4.66]. A incerteza na determinação dos valores de C e n pode ser obtida pelos métodos apresentados em vários documentos [4.63], [4.66], [4.71] e do mesmo modo a incerteza do caudal [4.6], [4.72].

4.4. ANÁLISE DAS POTENCIALIDADES DAS TÉCNICAS DO MÉTODO DO GÁS TRAÇADOR

4.4.1. OBJECTIVO

No sentido de se realizar uma análise das potencialidades de algumas técnicas do método do gás traçador, levou-se a efeito um conjunto de ensaios num apartamento do tipo T1 pertencente à Universidade de Gävle (Dept. of Technology and Built Environment) -

Suécia. O apartamento encontra-se inserido no interior de um pavilhão e foi concebido para permitir medir sistemas de ventilação em condições controladas.

4.4.2. CARACTERÍSTICAS E CONDIÇÕES DE ENSAIO

Os ensaios foram realizados em Agosto de 2005, recorreram a 3 técnicas do método do gás traçador (declive - T1, emissão constante - T3 e concentração constante - T6, ver §4.2.1), seguindo as metodologias expostas neste capítulo. As medições tiveram uma duração variável entre 9 a 96 h.

O sistema de ventilação ensaiado recorria a vários regimes de funcionamento, nomeadamente, a caudais descontínuos, sistema usual em Portugal.

As características do edifício e do sistema de ventilação estão descritas no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 - Características do apartamento e do sistema de ventilação - Gävle.

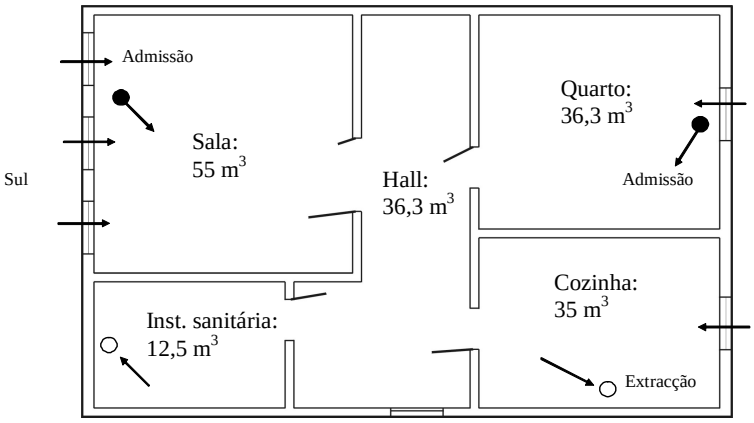
Características	Descrição
Localização	Gävle - Suécia
Sistema construtivo	- Construção em madeira com somente uma fachada (Sul) em contacto com o exterior (Área = 70 m^2; pé-direito = 2,5 m); - 3 janelas de abrir para o exterior na sala; 1 janela no quarto e 1 janela na cozinha, ambas confinando com uma câmara de temperatura regulável (no presente ensaio não funcionou); - Aquecimento central; - Isolamento térmico reforçado (ex.: 17 cm de lã vidro no tecto).
Tipologia do apartamento	T1
Sistema de ventilação ensaiado	- Admissão de ar por grelhas fixas na caixilharia das janelas; alternativamente, a admissão pode ser realizada por aberturas nos tectos dos compartimentos;[(a) (b)] - Extracção mecânica na instalação sanitária (ϕ100) e cozinha (ϕ100); - Folgas ajustáveis sob/sobre portas.[(c)]
Renovações horárias a 50 Pa (RPH_{50})	0,8 h^{-1}.

Notas:
- a: como o apartamento tem uma baixa permeabilidade ao ar, a maior parte da entrada deste verifica-se nas aberturas realizadas para o efeito (grelhas na caixilharia ou aberturas no tecto);
- b: devido a dificuldades experimentais, optou-se pela entrada de ar através de aberturas fixas nos tectos da sala e quarto (ϕ100), deste modo, ambas as aberturas têm um diferencial de temperatura e pressão igual;
- c: somente se implementou uma folga sob as portas (2×0,7 m^2) da instalação sanitária e cozinha com 2 cm de altura (140 cm^2).

Na Figura 4.13 apresentam-se o alçado lateral esquerdo (Sul), uma perspectiva e a planta do apartamento estudado.

a)

b)



c)

Figura 4.13 - Apartamento estudado - Gävle, a) alçado lateral esquerdo (Sul), b) perspectiva, c) planta.

O equipamento usado foi o seguinte:

- analisador de gás N_2O, referência Brüel & Kjær, recorrendo ao princípio da espectroscopia fotoacústica de radiação infravermelha;
- equipamento de dosagem e recolha de gás, referência Brüel & Kjær 1303, com capacidade de amostragem de seis pontos;

- 5 ventiladores com potência de 35 W e 2 de 25 W no corredor (dois na sala e hall e um em cada um dos restantes compartimentos);
- termopares para medição da temperatura.

Na Figura 4.14 apresenta-se a planta do apartamento com indicação da posição do equipamento usado no método do gás traçador.

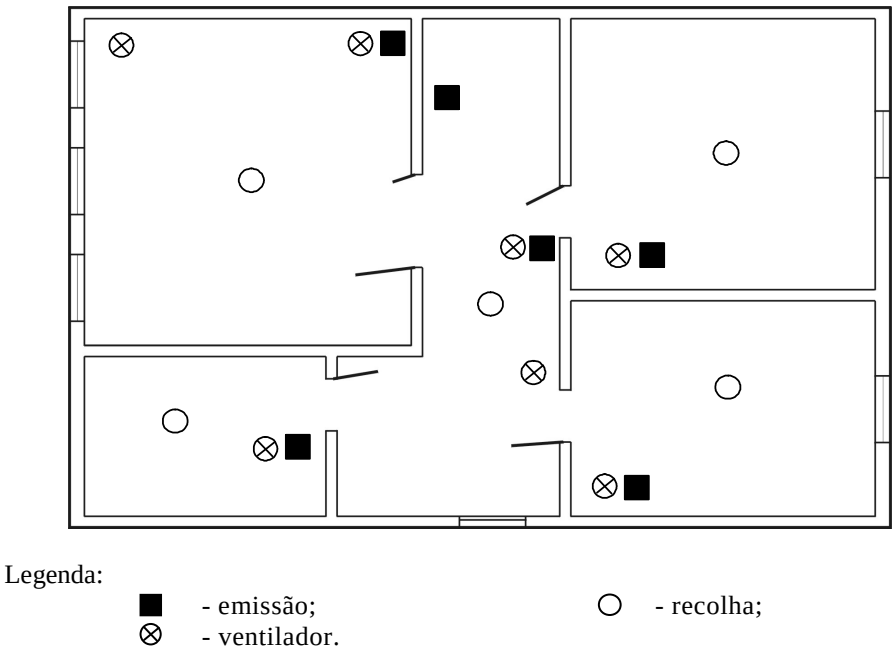


Figura 4.14 - Planta do apartamento com indicação da posição do equipamento usado no método do gás traçador - Gävle.

As condições de medição/registo das variáveis foram as seguintes:

- a emissão do gás traçador foi realizada na parte posterior do ventilador e a recolha a meia altura do compartimento;
- a temperatura no interior do apartamento e no pavilhão foi registada com intervalos de um minuto recorrendo a termopares;
- a temperatura no apartamento resultou de uma média das temperaturas obtidas nos compartimentos a 0,20 m do pavimento e a 0,20 m do tecto;
- os caudais de extracção na cozinha e instalação sanitária foram medidos recorrendo ao método do orifício com uma exactidão de ±1%.

Os sistemas de ventilação ensaiados tiveram como objectivo simular as condições existentes nos sistemas correntemente usados em Portugal. As situações de ventilação natural foram simuladas com ventilação mecânica com caudais reduzidos. Sendo assim, os ensaios tiveram os seguintes objectivos:

- simular as condições de ventilação mecânica na situação de caudais máximos: 4 *RPH* na cozinha (140 m^3/h) e instalação sanitária (50 m^3/h) - 18, 22, 23 e 26 de Agosto;
- simular as condições de ventilação mecânica/natural na situação de caudais reduzidos: 2 *RPH* na cozinha (70 m^3/h) e instalação sanitária (25 m^3/h) - 24 de Agosto;
- simular as condições de ventilação mecânica/natural na situação de caudais reduzidos, com incremento "mecânico" na cozinha na situação de confecção das refeições: 2 *RPH* na cozinha (70 m^3/h) e instalação sanitária (25 m^3/h) e incremento para 4 *RPH* durante 2 h na cozinha (140 m^3/h) - 24 de Agosto;
- simular as condições de ventilação natural na instalação sanitária com extracção mecânica descontínua na cozinha, com incremento nesta na situação de confecção das refeições: caudal nulo na cozinha e caudal reduzido na instalação sanitária, 2 *RPH* (25 m^3/h), e incremento para 4 *RPH* durante 2 h na cozinha (140 m^3/h) - 25 de Agosto.

4.4.3. RESULTADOS OBTIDOS

Apresenta-se na Figura 4.15 a evolução da concentração de N_2O para o ensaio de 22 de Agosto de 2005. Os caudais extraídos são 140 m^3/h na cozinha e 50 m^3/h na instalação sanitária (definiu-se uma concentração de 50 ppm como concentração alvo para o ensaio da concentração constante). Da primeira parte do ensaio, com concentração constante, podem-se retirar os caudais de ar fresco em cada compartimento. Da segunda parte do ensaio, com decaimento da concentração, pode-se retirar a renovação horária global ou indirectamente o caudal global.

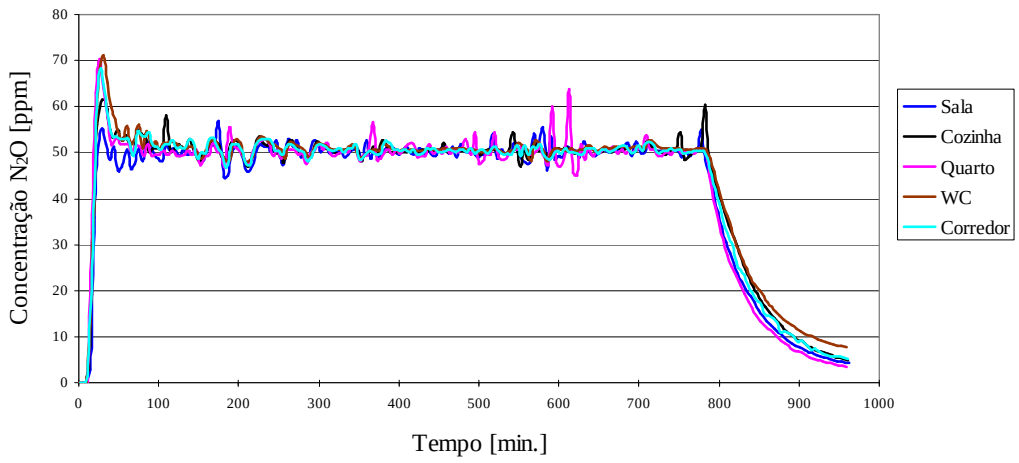


Figura 4.15 - Evolução da concentração de N_2O nos diversos compartimentos no ensaio de 22 de Agosto de 2005 (concentração constante + declive).

Apresentam-se na Figura 4.16 a evolução dos caudais de ar novo (ar fresco vindo do exterior) em cada compartimento para o ensaio atrás apresentado (22 de Agosto de 2005).

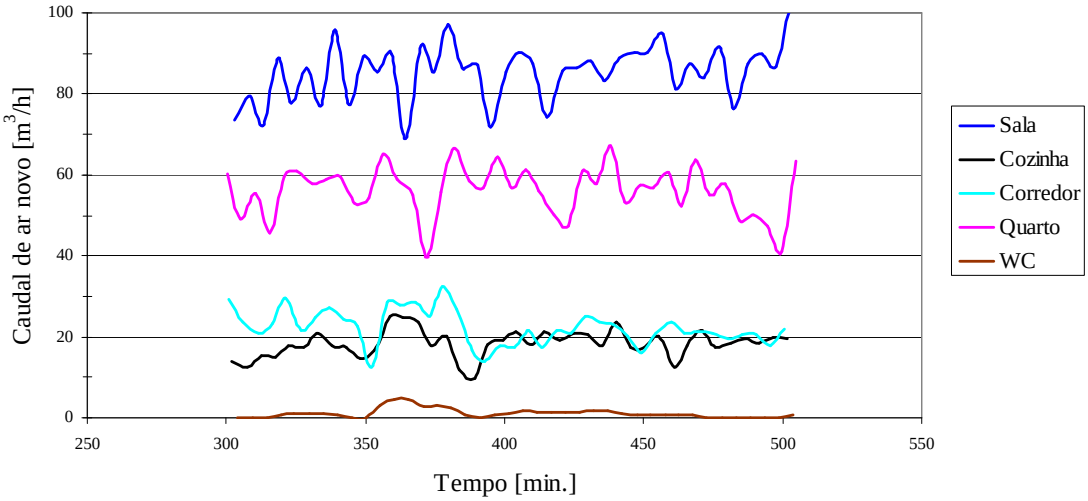


Figura 4.16 - Evolução dos caudais de ar novo nos diversos compartimentos no ensaio de 22 de Agosto de 2005 (concentração constante).

Na Figura 4.17 apresenta-se a evolução dos caudais de ar novo em cada compartimento para o ensaio de 25 de Agosto de 2005, somente com um caudal de extracção de 25 m^3/h na instalação sanitária. Na cozinha o caudal é nulo, no entanto, com incremento para 140 m^3/h entre os 180 e os 300 minutos.

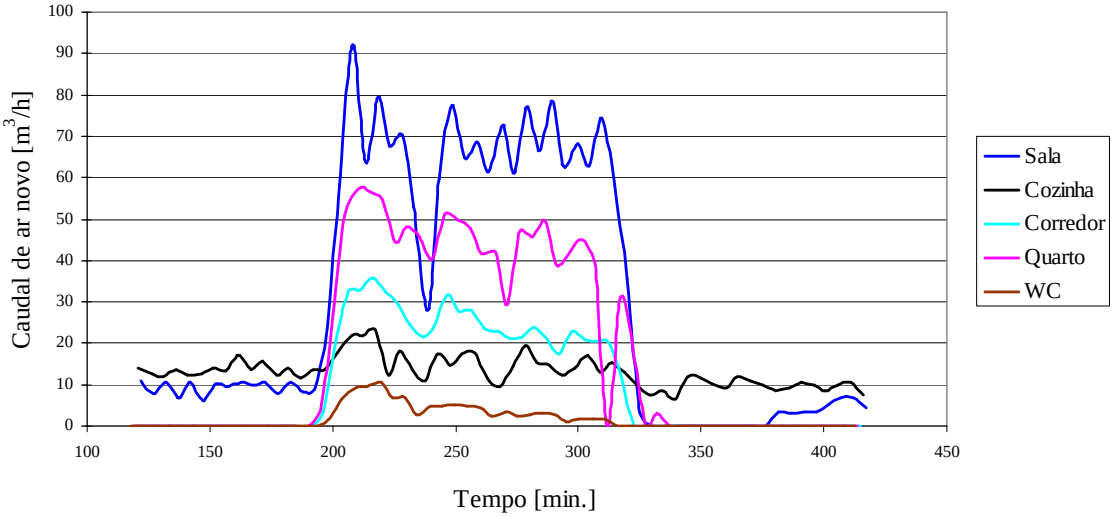


Figura 4.17 - Evolução dos caudais de ar novo nos diversos compartimentos no ensaio de 25 de Agosto de 2005 (caudais descontínuos; concentração constante).

No Quadro 4.7 apresentam-se todos os ensaios realizados e os respectivos resultados.

Quadro 4.7 - Descrição dos ensaios e respectivos resultados - Gävle.

	Caudais extraídos			Caudais medidos através das técnicas do método do gás traçador						
Data de início e duração do ensaio	$q_{ext\ vent\ mecânica}$ [m^3/h]			$q_{declive}$ [m^3/h]	$q_{emi\ const}$ [m^3/h]	$q_{conc\ constante\ (ar\ novo)}$ [m^3/h]				$\Delta T_{int\text{-}lab}$ [ºC]
	$q_{ext\ cozinha}$	$q_{ext\ inst.sanit}$	$q_{ext\ total}$			q_{sala}	q_{quarto}	q_{outros}	q_{total}	
18/08 (14 h)[a]:	140	50	190	169,2	-	85,2	59,3	46,6	191,1	3,3
22/08 (16 h)[b]:	140	50	190	159,5	-	87,5	57,7	42,8	188,1	-
23/08 (22 h)[c]:	140	50	190	163,6	-	81,8	54,4	53,4	189,6	3,6
24/08 (7 h)[d]:	70	25	95	82,6	-	44,3	32,0	19,4	95,8	3,5
24/08 (2 h)[d]:	140	25	165	-	-	74,8	51,7	45,0	171,5	3,5
25/08 (7 h)[e]:	0	25	25	15,3	-	6,3	0,1	12,6	19,0	2,0
25/08 (2 h)[e]:	140	25	165	-	-	77,4	48,4	39,4	165,2	2,0
26/08 (96 h)[f]:	140	50	190	180,8	204,7	73,4	59,8	49,2	182,4	1,8

Notas:
- a: técnica da concentração constante com 12 h e técnica do declive com 2 h; portas abertas;
- b: técnica da concentração constante com 13 h e técnica do declive com 3 h; portas abertas;
- c: técnica da concentração constante com 19 h e técnica do declive com 3 h; portas inst. sanitária e cozinha fechadas;
- d: técnica da concentração constante com 5 h e técnica do declive com 2 h; passagem de caudal na cozinha para 4 *RPH* durante 2 horas; portas abertas;
- e: técnica da concentração constante com 5 h e técnica do declive com 2 h; passagem de caudal nulo na cozinha para 4 *RPH* durante 2 horas; portas abertas;
- f: ciclos com técnica da concentração constante com 8 h, técnica do declive com 8 h, técnica da emissão constante com 8 h e técnica do declive com 8 h; portas fechadas com folga inferior de 2 cm.

4.4.4. CONCLUSÕES DOS ENSAIOS

As principais conclusões a retirar dos ensaios realizados são as seguintes:

- a única técnica que permite obter caudais de ar novo (ar fresco) em cada compartimento é a técnica da concentração constante. Simultaneamente, é a técnica que obtém caudais com maior exactidão em relação aos caudais nominais de extracção (desvios entre 1 a 4%). No entanto, para caudal variável, apresenta resultados com menor exactidão (ver ensaios dos dias 24 e 25 de Agosto);
- apesar da baixa permeabilidade ao ar da envolvente, a técnica da concentração constante revela que, em média, a entrada de ar novo pelos compartimentos sem entradas de ar próprias para o efeito (cozinha, corredor e inst. sanitária) situa-se entre 20 a 30% do total. Esta percentagem advém do facto de que uma parte do ar novo que entra pela sala e pelo quarto desloca-se para os outros compartimentos sem se misturar nos compartimentos de admissão [4.13], [4.29];
- analisando os três primeiros ensaios, verifica-se que o fecho das portas dos compartimentos com extracção, cozinha e instalação sanitária, não influencia significativamente o caudal total medido. No entanto, a técnica do declive apresenta variações maiores em relação à técnica da concentração constante. A análise do último ensaio, com todas as portas fechadas, revela que a exactidão da técnica do declive melhora ao contrário da técnica da concentração constante;
- as técnicas do declive e emissão constante revelam exactidão semelhante, em relação aos caudais nominais de extracção, embora, no caso desta última técnica, com sobrestimação.

Relativamente aos sistemas de ventilação ensaiados, podem-se retirar as seguintes conclusões principais:

- a sala tem uma entrada de ar novo entre 55 a 60% do total de ar novo. A instalação sanitária regista um caudal de ar novo bastante baixo, uma vez que não apresenta aberturas (portas ou janelas) para o exterior;
- a simulação de ventilação natural na instalação sanitária e caudal nulo na cozinha (25 de Agosto) revela que, neste caso, o ar novo não entra predominantemente pelas

entradas de ar da sala e quarto (uma possível explicação para este facto foi apontada nos pontos anteriores).

4.5. SÍNTESE CRÍTICA

O presente capítulo pretendeu descrever sucintamente os métodos do gás traçador e de pressurização. Devido ao carácter inovador da sua aplicação em Portugal, desenvolveu-se mais aprofundadamente a técnica PFT.

Das técnicas apresentadas e dos ensaios realizados, poderão salientar-se as seguintes conclusões:

- a técnica da concentração constante é adequada para determinar caudais "instantâneos" de ar novo em cada compartimento. No entanto, é bastante intrusiva;
- a técnica do declive é adequada para obter resultados rápidos, permitindo a comparação de resultados entre diversos momentos, habitações ou sistemas de ventilação;
- a técnica PFT é adequada para obter resultados médios com a vantagem de ser uma técnica não intrusiva;
- o método de pressurização é um auxiliar precioso na determinação da permeabilidade da envolvente de edifícios de habitação, permitindo fazer, nomeadamente, comparações relativas da permeabilidade das habitações e da eficácia das operações de reabilitação.

Como já referido no §4.2.7, nas diversas campanhas experimentais realizadas no âmbito da presente tese recorreu-se ao uso das técnicas PFT e do declive.

BIBLIOGRAFIA DO CAPÍTULO 4

[4.1] Awbi, H., Ventilation of Buildings, 2nd Edition, E & FN Spon, 2003.

[4.2] Roulet, C.; Vandaele, L., Air Flow Patterns Within Buildings. Measurement Techniques, Technical Note 34, Annex 5-AIVC, IEA-ECBCS, 1991.

[4.3] Afonso, C., Uma Metodologia para a Caracterização de Fluxos de ar Multizona em Edifícios, Tese de Doutoramento Submetida à FEUP, 1989.

[4.4] Stymne, H.; Sandberg, M.; Boman, C., Tracer Gas Techniques for Measurements of Ventilation in Multi-zone Buildings. A Review, 9th Indoor Air Conference, Monterey, USA, 2002.

[4.5] Afonso, C., Modelização do Movimento do Ar no Interior de Edifícios Através do Recurso ao Método do Gás Traçador, Tese de Mestrado Submetida à FEUP, 1986.

[4.6] Etheridge, D.; Sandberg, M., Building Ventilation. Theory and Measurement, John Wiley & Sons, 1996.

[4.7] Laporthe, S.; Virgone, J.; Castanet, S., A Comparative Study of Two Tracer Gases. SF_6 and N_2O, Building and Environment, Vol. 36, 2001, p. 313-320.

[4.8] ISO, Indoor air. Determination of Local Mean Ages of Air in Buildings for Characterizing Ventilation Conditions, Draft International Standard ISO/DIS 16000-8, International Organization for Standardization, Geneva, 2006.

[4.9] ASTM, Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution, E 741-00, American Society for Testing Materials, West Conshohocken, USA, 2000.

[4.10] Innova, 1312 Photoacoustic Multi-gas Monitor. Instruction Manual, Innova, Denmark, 1997.

[4.11] Roulet, C.; Compagnon, R., Multizone Tracer Gas Infiltration Measurements. Interpretation Algorithms for Non-Isothermal Cases, Building and Environment, Vol. 24, 1989, p. 221-227.

[4.12] Maldonado, E.; Woods, J., A Method to Select Locations for Indoor Air Quality Sampling, Building and Environment, Vol. 18, 1983, p. 171-180.

[4.13] Sandberg, M.; Blomqvist, C., A Quantitative Estimate of the Accuracy of Tracer Gas Methods for the Determination of the Ventilation Flow Rate in Buildings, Building and Environment, Vol. 20, 1985, p. 139-150.

[4.14] NORDTEST, Buildings. Total Outdoor Air Inflow, NT VVS 055, Organization for Testing in the Nordic Countries, Espoo, Finland, 1987.

[4.15] ISO, Thermal Performance of Buildings. Determination of Air Change in Buildings. Tracer Gas Dilution Method, ISO 12 569, International Organization for Standardization, Geneva, 2000.

[4.16] NORDTEST, Buildings. Rate of Ventilation in Different parts of a Building, NT BUILD 232, Organization for Testing in the Nordic Countries, Espoo, Finland, 1982.

[4.17] Brohus, H.; Frier, C., Tracer Gas Measurement of Air Flow in a Multizone Building, 8th Roomvent Conference, Copenhagen, Denmark, 2002.

[4.18] Reardon, J.; Atif, M.; Shaw, C., Tracer Gas Measurements for Ventilation, Air Movement and Air Infiltration in a Four-Sided Atrium Office Building, International Journal of Ventilation, Vol. 1, 2002, p. 13-22.

[4.19] Roulet, C.; Foradini, F., Simple and Cheap Air Change Rate Measurements using CO_2 Concentration Decays, International Journal of Ventilation, Vol. 1, 2002, p. 39-44.

[4.20] Afonso, C.; Maldonado, E., Determinação de Níveis de Infiltrações Típicos em Edifícios Portugueses, 3.as Jornadas de Física e Tecnologia de Edifícios, Lisboa, 1988.

[4.21] Gonçalves, H., Interacção de Sistemas Solares Passivos de Ganho Directo e de Ganho Indirecto. Estudo Numérico e Experimental, Tese de Doutoramento Submetida à FEUP, Porto, 1990.

[4.22] Silva, A., Caracterização das Infiltrações Médias Anuais em Edifícios Portugueses Através do Método de Pressurização, Tese de Mestrado Submetida à FEUP, 1991.

[4.23] Finteiro, A., Diagnóstico das Condições de Ventilação em Edifícios de Habitação, Tese de Mestrado Submetida à FEUP, 1999.

[4.24] Piedade, A.; Rodrigues, A., Deficiências de Ventilação na Origem de Manifestação de Humidades em Edifícios. Um Caso de Estudo, Construção 2001, Congresso Nacional da Construção, Lisboa, 2001.

[4.25] Afonso, C. *et al*, Air Exchange Rates and Indoor Air Quality in Offices of the New Faculty of Engineering of Oporto University, 9th Roomvent Conference, Coimbra, Portugal, 2004.

[4.26] Innova, Photoacoustic Spectroscopy, Innova, Denmark.

[4.27] Conceição, E., Estudo Aero-térmico de Habitáculos de Veículos de Transporte de Passageiros, Tese de Doutoramento Submetida à FCTUC, 1996.

[4.28] NORDTEST, Total Ventilation Air Flow Rate. Continuous Measurement. Constant Flow Technique, NT VVS 074, Organization for Testing in the Nordic Countries, Espoo, Finland, 1989.

[4.29] Sandberg, M.; Stymne, H., The Constant Tracer Flow Technique, Building and Environment, Vol. 24, 1989, p. 209-219.

[4.30] Afonso, C.; Oliveira, A., Solar Chimneys: Simulation and Experiment, Energy and Buildings, Vol. 32, 2000, p. 71-79.

[4.31] Sherman, M., Analysis of Errors Associated with Passive Ventilation Measurement Techniques, Building and Environment, Vol. 24, 1989, p. 131-139.

[4.32] Dietz, R.; Cote, E., Air Infiltration Measurements in a Home using a Convenient Perfluorocarbon Tracer Technique, Environment International, Vol. 8, 1982, p. 419-433.

[4.33] Sateri, J., The Development of the PFT-Method in the Nordic Countries, Swedish Council for Building Research, Sweden, 1991.

[4.34] Walker, R.; White, M., The Passive Gas Tracer Method for Monitoring ventilation Rates in Buildings, Information Paper 13/95, Building Research Establishment, 1995.

[4.35] Dorer, V. *et al*, Validation Tests for a Passive Tracer Gas Technique, 8th Roomvent Conference, Reading, United Kingdom, 2000.

[4.36] Mihara, K.. *et al*, Measurement of Ventilation Airflow Rates of Occupied Houses by Three Different Methods. Comparison Between Three Different Methods, 10th Indoor Air Conference, Beijing, China, 2005.

[4.37] Stymne, H.; Eliasson, A., A New Passive Tracer Gas Technique for Ventilation Measurements, 12th AIVC Conference, Ottawa, Canada, 1991.

[4.38] Stymne, H.; Sandberg, M.; Holmgren, O., Ventilation Measurements in Large Premises, 3rd Roomvent Conference, Aalborg, Denmark, 1992.

[4.39] NORDTEST, Ventilation. Flow Rate, Total Effective - by Single Zone Approximation, NT VVS 105, Organization for Testing in the Nordic Countries, Espoo, Finland, 1994.

[4.40] Stymne, H.; Boman, C., Measurement of Ventilation and Air Distribution Using the Homogeneous Emission Technique. A Validation, 4th Healthy Buildings Conference, Budapest, Hungary, 1994.

[4.41] NORDTEST, Ventilation. Local Mean Age of Air. Homogeneous Emission Techniques, NT VVS 118, Organization for Testing in the Nordic Countries, Espoo, Finland, 1997.

[4.42] Stymne H., Monitoring of Ventilation Rate and Air Distribution Patterns in an Apartment Block using the Homogeneous Emission Technique, Joint Research Centre, Ispra, Italy, Final report contract n.º 5607-93-11 EI ISP S, 1994.

[4.43] Stymne, H.; Boman, C., Application of a Passive Tracer Gas Technique in Naturally and Mechanical Ventilated School Buildings, 17th AIVC Conference, Gothenburg, Sweden, 1996.

[4.44] Blomsterberg, Å.; Carlsson, T., Kronvall, J., Short Term and Long Term Measurements of Ventilation in Dwellings, 16th AIVC Conference, Palm Springs, USA, 1995.

[4.45] Stymne, H.; Boman, C.; Kronvall, J., Measuring Ventilation Rates in the Swedish Housing Stock, Building and Environment, Vol. 29, 1994, p. 373-379.

[4.46] Öie, L. *et al*, The Ventilation Rate of 344 Oslo Residences, Indoor Air, Vol. 8, 1998, p. 190-196.

[4.47] Stymne, H.; Emenius, G.; Boman, C., Passive Tracer Gas Measurements of the Long Term Variation of Ventilation in Three Swedish Dwellings, International Journal of Ventilation, Vol. 5, 2006, p. 333-343.

[4.48] Pinto, M.; Freitas, V., Importância da Ventilação nas Condensações Superficiais. Medição das Renovações Horárias pela Técnica PFT, 1.º Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, Porto, 2003.

[4.49] Pinto, M. *et tal*, Air Change Rates In Multi-Family Residential Buildings In Northern Portugal, 7th Healthy Buildings Conference, National University of Singapore, Singapore, 2003.

[4.50] Axley, J; Persily, A., Integral Mass Balances and Pulse Injection Tracer-Techniques, 9th AIVC Conference, Gent, Belgium, 1988.

[4.51] Blomsterberg, Å., Ventilation and Airtightness in Low-rise Residential Buildings, Swedish Council for Building Research, Stockholm, Sweden, 1990.

[4.52] Takaki, T. *et al*, Measurement of Ventilation Rates of Occupied Houses by Three Different Methods. Measurement by the Constant Concentration Method, 10th Indoor Air Conference, Beijing, China, 2005.

[4.53] Bohac, D.; Harrje, D.; Horner, G.; Field Study of Constant Concentration and PFT Infiltration Measurements, 8th AIVC Conference, Überlingen, Federal Republic of Germany, Belgium, 1987.

[4.54] Chao, C.; Wan, M.; Law, A., Ventilation Performance Measurement using Constant Concentration Dosing Strategy, Building and Environment, Vol. 39, 2004, p. 1277-1288.

[4.55] Fortmann, R.; Nagda, N.; Rector, H., Comparison of Methods for the Measurement of Air Change Rates and Interzonal Airflows in Two Test Residences, ASTM STP 1067, American Society for Testing Materials, Philadelphia, USA, 1990, p. 104-118.

[4.56] ASTM, Standard Test Method for Field Measurement of Air Leakage Through Installed Exterior Windows and Doors, E 783-02, American Society for Testing Materials, West Conshohocken, USA, 1993.

[4.57] ASTM, Standard Test Method for Air leakage Through Exterior Windows, Curtain Walls, and Doors Under Specified Pressure Differences Across the Specimen, E 283-04, American Society for Testing Materials, West Conshohocken, USA, 1993.

[4.58] CEN, Windows and Doors. Air Permeability. Test Method, EN 1026, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2000.

[4.59] Abrantes, V., Análise Numérica e Experimental do Comportamento Térmico de Coberturas com Desvão, Dissertação de Doutoramento Submetida à FEUP, Porto, 1984.

[4.60] Mimoso, J.; Braz, J., Ensaio de Janelas. Sobre a Qualidade da Caixilharia de Alumínio Ensaiada no LNEC, LNEC, 1986.

[4.61] Neves, R., Permeabilidade ao Ar de Caixas de Estore, 3.as Jornadas de Física e Tecnologia de Edifícios, Lisboa, 1988.

[4.62] Pinto, A., Recomendações para Limites da Permeabilidade ao Ar da Envolvente, Seminário sobre Aplicação da Ventilação Natural e Mista, LNEC, Lisboa, 2007.

[4.63] ASTM, Standard Test Method for Determining Air Leakage Rate by Fan Pressurization, E 779-03, American Society for Testing Materials, West Conshohocken, USA, 2003.

[4.64] CEN, Windows and Doors. Air Permeability. Classification, EN 12207, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1999.

[4.65] Orme, M.; Leksmono, N., Ventilation Modelling Data Guide, AIVC Guide 5, Annex 5-AIVC, IEA-ECBCS, 2002.

[4.66] CEN, Thermal Performance of Buildings. Determination of Air Permeability of Buildings. Fan Pressurization Method, EN 13 829, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2000.

[4.67] Flanders, S., Fan Pressurization Measurements by Four Protocols, 16th AIVC Conference, Palm Springs, USA, 1995.

[4.68] Orme, M.; Liddament, M.; Wilsom, A., An Analysis and Data Summary of the AIVC´s Numerical Database, Technical Note 44, Annex 5-AIVC, IEA-ECBCS, 1998.

[4.69] Bossaer, A. *et al*, Airtightness Performance in New Belgian Dwellings, 19th AIVC Conference, Oslo, Norway, 1998.

[4.70] Litvak, A. *et al*, Airtightness of French Dwellings. Results from Field Measurements Studies, 21st AIVC Conference, Hague, Netherlands, 2000.

[4.71] Sherman, M., Uncertainties in Fan Pressurization Measurements, Technical Report LBNL-32 115, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, USA, 1995.

[4.72] ASTM, Standard Test Methods for Determining Airtightness of Buildings using an Orifice Blower Door, E 1827-07, American Society for Testing Materials, West Conshohocken, USA, 2002.

5. SISTEMAS DE VENTILAÇÃO CORRENTEMENTE USADOS EM EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO EM PORTUGAL

5.1. DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS DE VENTILAÇÃO CORRENTEMENTE USADOS

5.1.1. SISTEMAS DE VENTILAÇÃO NATURAL

Em edifícios residenciais, os sistemas de ventilação destinam-se no essencial a assegurar a qualidade do ar interior, fornecer ar "novo" para os aparelhos de combustão e assegurar a exaustão dos produtos da combustão. Esta ventilação deve ser assegurada em condições de conforto, segurança e minimizando os consumos energéticos [5.1]. No essencial, existem dois tipos de sistemas: os sistemas com ventilação natural e os sistemas com ventilação mecânica. No entanto, tendo como objectivo potenciar as vantagens destes dois sistemas, têm sido recentemente desenvolvidos sistemas híbridos, ainda numa fase embrionária, que recorrem a dispositivos "inteligentes" de modo a permutar entre os dois modos de funcionamento (natural e mecânico) [5.2].

A ventilação natural é tão antiga como a arte de construir edifícios. Deste modo, existe uma grande experiência acumulada relativa a inúmeros sistemas que ao longo dos séculos foram aplicados e que, ainda nos nossos dias, são fonte de inspiração.

De seguida faz-se uma descrição sumária das estratégias de ventilação natural mais conhecidas (adaptado de [5.1], [5.3], [5.4], [5.5], [5.6], [5.7], [5.8], [5.9]):

- infiltração / exfiltração: utilização das frinchas dos elementos da envolvente, nomeadamente, das portas e janelas, para proporcionar a admissão e exaustão de ar;
- ventilação em fachada única: admissão e exaustão de ar através de aberturas, grelhas ou janelas, colocadas numa única fachada;
- ventilação cruzada: admissão e exaustão de ar através de aberturas, grelhas ou janelas, colocadas em fachadas opostas ou em pontos opostos do mesmo compartimento;
- ventilação através de condutas: admissão de ar através de aberturas, frinchas ou grelhas, colocadas na envolvente e exaustão de ar através de condutas localizadas nos compartimentos de serviço, cozinha e instalação sanitária, principalmente nesta, se for um compartimento interior.

Frequentemente, os sistemas descritos anteriormente surgem associados entre si.

Os sistemas de ventilação natural continuam a ser predominantes, principalmente em moradias unifamiliares, em países como a Itália, Reino Unido e Estados Unidos [5.6], [5.7]. Na Figura 5.1 apresenta-se o princípio geral de funcionamento de um sistema de ventilação natural do tipo "conjunta" (Ver anexo A: Terminologia), segundo a NP 1037-1: 2002 [5.10].

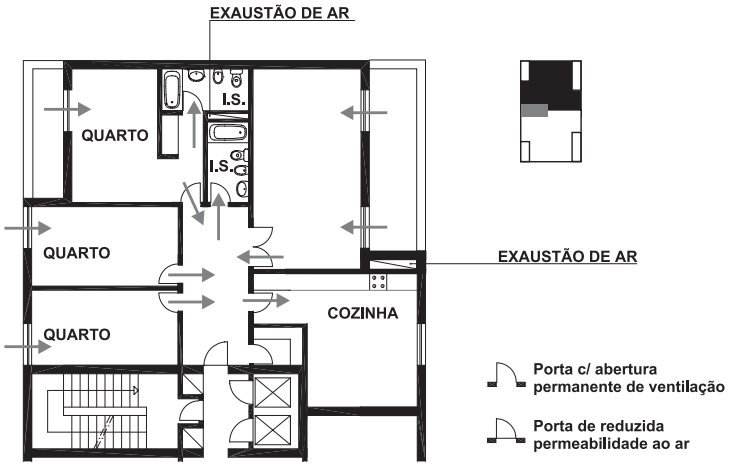


Figura 5.1 - Princípio geral de funcionamento de um sistema de ventilação natural: ventilação conjunta [5.10].

5.1.2. SISTEMAS DE VENTILAÇÃO MECÂNICA

Os sistemas de ventilação mecânica permitem um melhor controlo das taxas de ventilação, comparativamente aos sistemas de ventilação natural. Contudo, além de outras desvantagens, é necessária energia para o funcionamento dos ventiladores, emitem ruído e exigem manutenção.

Apresentam-se de seguida os tipos mais correntes de sistemas de ventilação mecânica (adaptado de [5.1], [5.3], [5.4], [5.5], [5.6], [5.7], [5.8], [5.9]):

- insuflação mecânica: admissão de ar através de rede de condutas e ventiladores e exaustão de ar através de aberturas, frinchas ou grelhas, colocadas na envolvente ou condutas de ventilação natural. O sistema permite a utilização de pré-aquecimento e filtragem do ar de insuflação;
- extracção mecânica localizada e individual: admissão de ar através de aberturas, frinchas ou grelhas, colocadas na envolvente e extracção de ar através de ventiladores independentes, nos compartimentos de serviço, cozinha e instalação sanitária. A extracção frequentemente é descontínua, abrange somente um dos compartimentos de serviço e é individualizada para cada habitação;
- ventilação mecânica centralizada (VMC ou fluxo simples): admissão de ar através de aberturas, frinchas ou grelhas, colocadas na envolvente e extracção de ar através de ventiladores, nos compartimentos de serviço, cozinha e instalação sanitária. A exaustão frequentemente é contínua e comum a todo o edifício (centralizada e controlada num único ponto);
- ventilação mecânica de duplo fluxo (sistemas equilibrados): admissão e extracção de ar através de rede de condutas e ventiladores (o caudal de extracção é ligeiramente superior ao caudal de insuflação). O sistema frequentemente é controlado num único ponto e permite a utilização de filtros de ar e permutadores de calor.

Os sistemas de ventilação mecânica são predominantes nos países com clima frio, como a França, Canadá, Holanda e Suécia, tanto em moradias unifamiliares como em edifícios

multifamiliares [5.6], [5.7]. Na Figura 5.2 encontra-se representado um exemplo de um sistema tipo VMC.

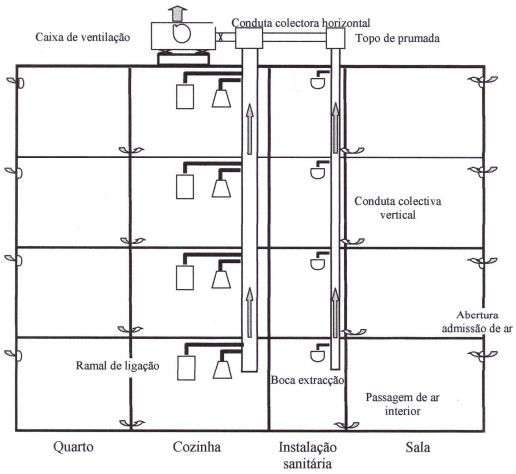


Figura 5.2 - Princípio geral de funcionamento de um sistema de ventilação VMC com admissão de ar na fachada [5.1].

5.1.3. SISTEMAS MISTOS

Frequentemente, em Portugal, os sistemas de ventilação natural e mecânica encontram-se associados, recorrendo à extracção mecânica individual na cozinha e extracção natural nas instalações sanitárias (Figura 5.3). A extracção mecânica é descontínua, funcionando em função das necessidades dos utilizadores e sem controlo dos caudais extraídos.

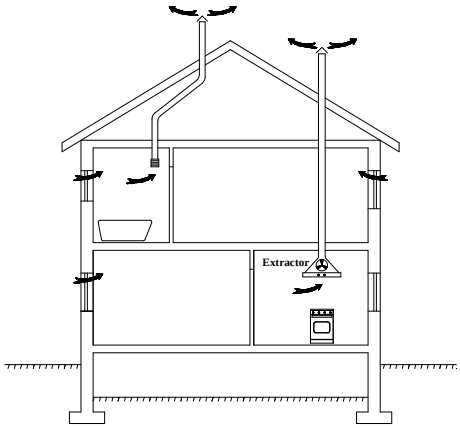


Figura 5.3 - Princípio geral de funcionamento de um sistema de ventilação misto.

5.2. LEGISLAÇÃO, NORMALIZAÇÃO E RECOMENDAÇÕES EXISTENTES EM PORTUGAL

Em Portugal, a legislação, normalização e recomendações sobre ventilação, na sua maioria, trata muito superficialmente a questão da ventilação. A mais relevante é a seguinte (por ordem cronológica):

- Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU: DL 38 382, de 7 de Agosto de 1951 [5.11]);
- Recomendações Técnicas para Habitação Social (Despacho 41/MES/85, de 5 de Fevereiro [5.12]);
- Norma Portuguesa NP 1037-1: Ventilação e Evacuação dos Produtos da Combustão dos Locais com Aparelhos a Gás. Parte 1: Edifícios de Habitação. Ventilação Natural, de 2002 [5.10];
- Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE: DL 79/06, de 4 de Abril [5.13]);
- Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE: DL 80/06, de 4 de Abril [5.14]).

Somente o RCCTE obriga ao cumprimento de um projecto de ventilação em edifícios residenciais, segundo a norma portuguesa NP 1037-1: 2002 [5.10], quando se adopta uma renovação horária mínima (0,6 h^{-1}). Existe, no entanto, uma obrigatoriedade indirecta de executar projectos de ventilação, devida ao facto de aquela norma ser referida em vários regulamentos ligados à área da distribuição de gás canalizado, tais como:

- Portaria 361/98, de 26 de Junho [5.15] (alterada pela Portaria 690/2001, de 10 de Julho): “Regulamento Técnico Relativo ao Projecto, Construção, Exploração e Manutenção das Instalações de Gás Combustível Canalizado em Edifícios”, no seu artigo 57.°, refere "*As condições técnicas, os materiais e a montagem dos dispositivos de ventilação dos locais e evacuação dos produtos da combustão devem obedecer às normas técnicas aplicáveis"* e ainda *"Nas operações de*

conversão ou de reconversão, a entidade exploradora deve verificar as condições de ventilação e evacuação dos produtos de combustão";

- DL 521/99, de 10 de Dezembro [5.16]: "Normas a que ficam Sujeitos os Projectos de Instalações de Gás em Edifícios e Regime Aplicável à Inspecção de Instalações", no seu artigo 6.º, ponto 3, refere "*O projectista deve certificar-se de que as condições de ventilação dos locais e a evacuação dos produtos da combustão satisfazem os requisitos das normas técnicas aplicáveis*" e no seu artigo 14.°, ponto 4, refere "*As inspecções previstas* (...) *abrangem as instalações de gás nos edifícios, incluindo o interior dos fogos, os aparelhos de queima, a ventilação e a exaustão dos produtos de combustão*";
- Portaria 362/00, de 20 de Junho [5.17] (alterada pela Portaria 690/01, de 10 de Julho): "Procedimentos Relativos às Inspecções e à Manutenção das Redes e Ramais de Distribuição e Instalações de Gás", no seu artigo 9.°, ponto 3, refere "*A verificação das condições de ventilação e de exaustão dos produtos de combustão deve obedecer ao disposto na NP 1037* (...)".

Conclui-se que a NP 1037-1: 2002 [5.10] é o documento mais actualizado que trata dos sistemas de ventilação. Sendo assim, pela importância que esta norma tem no actual contexto legislativo e normativo português, seguidamente far-se-á uma breve apresentação da mesma.

Este documento normativo é parte de um conjunto mais vasto que constitui a já citada norma NP 1037. Esta trata no geral a ventilação e exaustão dos produtos da combustão dos locais com aparelhos a gás. Esta norma é constituída pelas seguintes partes, das quais falta apenas publicar a 2.ª parte:

- Parte l: Edifícios de habitação. Ventilação natural;
- Parte 2: Edifícios de habitação. Ventilação mecânica;
- Parte 3: Volume dos locais. Posicionamento dos aparelhos a gás;
- Parte 4: Instalação e ventilação de cozinhas profissionais.

Realçam-se algumas das recomendações gerais da norma, assim [5.10]:

- o sistema de ventilação das habitações deve ser geral e permanente, ou seja, deve existir permanentemente admissão e exaustão de ar, que origine a renovação horária, nas taxas recomendáveis e em todos os compartimentos. Se adoptarmos a ventilação conjunta, esta deve possuir as admissões de ar nos compartimentos principais e as respectivas exaustões nos compartimentos de serviço;
- estipulam-se taxas médias de uma renovação por hora nos compartimentos principais (quartos e salas, com caudais de ar novo) e quatro renovações por hora nos compartimentos de serviço (cozinhas e instalações sanitárias);
- nos locais onde estiverem instalados aparelhos a gás, o caudal-tipo de admissão a considerar deverá ser proporcional à potência nominal do aparelho, fogão, esquentador ou caldeira, em kW;
- recomenda-se a utilização de grelhas de admissão auto-reguláveis em função da exposição ao vento das fachadas;
- deve-se considerar em separado a ventilação na estação de aquecimento e na estação de arrefecimento, pois, nesta última, a ventilação por tiragem térmica é reduzida. No Verão será necessário abrir as janelas que devem, preferencialmente, estar situadas em fachadas opostas, de modo a aproveitar o mais possível os diferenciais de pressão originados pelo vento;
- o sistema de ventilação funciona na estação de aquecimento, independentemente da abertura de janelas, através de dispositivos instalados nas fachadas ou ainda através de condutas de admissão de ar;
- a permeabilidade ao ar das janelas e das portas deve ser criteriosamente controlada, conforme a classe de exposição ao vento respectiva;
- a ventilação separada de compartimentos é recomendável para casos particulares. É o caso das salas com lareiras e das lavandarias com aparelhos a gás do tipo B. Estes são aparelhos em que o circuito de combustão não é independente dos compartimentos onde estão instalados;

- não é permitida a instalação de extracção mecânica conjuntamente com a ventilação natural, pois tal poderá originar graves alterações ao sistema de ventilação natural proposto;
- são apresentadas algumas recomendações relativas ao posicionamento das saídas das condutas de evacuação de ar.

O sistema de ventilação natural conjunta recomendado na NP 1037-1: 2002, inclui, essencialmente, os seguintes dispositivos [5.10]:

- grelhas de admissão de ar, fixas ou auto-reguláveis, que devem assegurar caudais iguais ou superiores aos previstos para os compartimentos principais onde estão aplicadas, para a diferença de pressão de 10 Pa;
- grelhas ou folgas de passagem de ar;
- grelhas de extracção de ar fixas;
- condutas individuais ou colectivas de exaustão de ar;
- ventiladores estáticos.

5.3. A IMPLEMENTAÇÃO DOS SISTEMAS E A INVESTIGAÇÃO EM PORTUGAL

Fazia parte dos hábitos quotidianos dos portugueses a necessidade de abrir janelas para proceder à ventilação dos edifícios. Contudo, as preocupações com os consumos de energia, as alterações do modo de vida das pessoas (as famílias encontram-se ausentes da habitação durante grande parte do dia) e a utilização de caixilharias de melhor qualidade, com menor permeabilidade ao ar, conduziram à diminuição drástica das renovações horárias de ar, aumentando o risco de condensações [5.18], [5.19], e à redução da qualidade do ar interior. Sendo assim, o controlo dos caudais de ventilação é um factor fundamental na resolução dos problemas de conforto e saúde.

Em contraponto com o exposto, encontra-se a deficiente prática do projecto de ventilação em Portugal. No sentido de fazer um ponto da situação, realizou-se um estudo [5.20] sobre a qualidade dos projectos de edifícios de habitação no que diz respeito à especialidade da ventilação. O estudo foi realizado na Área Metropolitana do Porto, mais especificamente nos concelhos do Porto, Maia, V. N. de Gaia e Matosinhos, tendo sido pesquisada uma amostra considerável de projectos que já tinham sido aprovados pelas respectivas Autarquias (pesquisa efectuada em 344 dos 2740 projectos licenciados em 1996 e 1997). Do estudo concluiu-se que 38,5% dos projectos analisados não tinham nenhuma referência à especialidade de ventilação. Dos restantes projectos, a grande maioria só possuía referências qualitativas relativamente à metodologia de ventilação, não havendo um correcto dimensionamento. No Quadro 5.1 podem observar-se os resultados obtidos relativamente ao levantamento do tipo de sistema de ventilação.

Quadro 5.1 - Sistema de ventilação previsto em projecto, segundo o tipo de edifício (adaptado de [5.20]).

Habitações unifamiliares				Edifícios de habitação multifamiliares			
Sistema mecânico	Sistema natural	Sistema misto	Sem referência	Sistema mecânico	Sistema natural	Sistema misto	Sem referência
32,7%	16,7%	11,5%	39,1%	40,9%	3,2%	18,1%	37,8%

Analisando o quadro anterior, verifica-se que nas habitações unifamiliares temos 16,7% dos projectos exclusivamente com ventilação natural. Embora menor que nos edifícios de habitação multifamiliar, a percentagem de projectos com ventilação mecânica é já preponderante nas moradias. O número de projectos sem qualquer referência à ventilação é, como se pode observar, muito elevado. Os edifícios de habitação multifamiliar em que se prevê exclusivamente a ventilação natural são em número muito reduzido (3,2%). Neste tipo de edifícios, em 59% dos projectos, prevê-se a ventilação mecânica de todos os compartimentos de serviço ou apenas da cozinha (sistema misto).

Na mesma linha de estudos, realizou-se na Primavera de 2000 um inquérito a cerca de 6 700 empresas do sector da Construção Civil (associadas da Associação dos Industriais da Construção Civil e Obras Públicas do Norte - AICCOPN) de modo a caracterizar os sistemas de ventilação dos edifícios de habitação em construção na Região Norte.

Obtiveram-se 140 respostas válidas, totalizando 2693 fogos. A maioria dos fogos (2651) localizava-se na Região Norte. Em face dos dados do Instituto Nacional de Estatística [5.21], o inquérito abrangeu sensivelmente 6 % dos edifícios de habitação construídos em 2000 na Região Norte.

Os fogos estudados apresentavam, na generalidade, as seguintes características [5.22], [5.23]:

- os apartamentos constituíam a grande maioria da amostra (93%);
- os fogos analisados eram predominantemente do tipo T2 ou T3, respectivamente com 31 e 46%;
- os fogos analisados inseriam-se predominantemente em edifícios de habitação colectiva com quatro (22,5%), cinco (18,8%) e seis (22,9%) pisos.

Os sistemas de ventilação abrangidos apresentavam as seguintes características principais [5.22], [5.23]:

- não existiu a preocupação de dotar os fogos com dispositivos específicos de entrada de ar nos compartimentos principais (quartos ou salas); somente 8% apresentavam grelhas fixas de admissão de ar;
- maioritariamente, nas instalações sanitárias (59%) e nas cozinhas (77%) a extracção de ar era realizada mecanicamente, em regime contínuo ou descontínuo;
- os ventiladores estáticos ou eólicos são de uso muito reduzido.

A acrescer aos dados apresentados, também podem ser referidos outros levantamentos estatísticos, embora não directamente relacionáveis com os estudos anteriores, nomeadamente, um inquérito realizado recentemente (2004) a 557 utilizadores em 8 cidades da região de Trás-os-Montes e Alto Douro [5.24] e um projecto comunitário concluído em 2005 [5.25].

Pela análise do exposto, e da observação da prática quotidiana, pode concluir-se o seguinte:

- o sistema exclusivamente de ventilação natural (ventilação conjunta) é pouco implementado (Figura 5.1). No entanto, quando usado, é o com maior frequência em edifícios multifamiliares, ditos de habitação social ou a custos controlados. Neste caso, inúmeras vezes os utentes adulteram o sistema introduzindo extracção mecânica descontínua na cozinha;
- o sistema exclusivamente de ventilação mecânica com exaustão colectiva tanto na cozinha como na instalação sanitária (VMC), é usado com maior frequência em edifícios multifamiliares (Figura 5.2);
- o sistema misto com ventilação mecânica intermitente na cozinha (recorrendo a extractor individual-hote; Figura 5.3) e ventilação natural nas instalações sanitárias, é usado tanto em moradias unifamiliares como em edifícios multifamiliares;
- os sistemas usados raramente incluem grelhas de admissão de ar, tanto nos sistemas de ventilação natural, como nos sistemas de ventilação mecânica;
- os inquéritos e/ou levantamentos estatísticos nem sempre são coerentes entre si. Isto pode resultar de um deficiente conhecimento dos conceitos ligados aos sistemas de ventilação, tanto por parte de projectistas como dos utilizadores. Sendo assim, em face de informação mais detalhada, pode admitir-se que o sistema misto é o sistema mais frequente, uma vez que pode enquadrar-se, para os menos conhecedores, nos conceitos de ventilação mecânica ou natural.

Apresenta-se no Quadro 5.2 uma análise comparativa entre os sistemas atrás expostos.

Quadro 5.2 - Análise comparativa das vantagens e inconvenientes dos sistemas de ventilação usados correntemente em edifícios de habitação [5.26].

Sistemas	Vantagens	Desvantagens
Ventilação natural	- Sem consumo de energia para o seu funcionamento. - Baixo custo do sistema (instalação, operação e manutenção). - Sem ruído emitido pelo funcionamento do sistema.	- Caudais e padrão de escoamento variáveis, podendo haver fases em que é necessário incrementar a ventilação por actuação nos dispositivos de ventilação ou abertura de janelas. - Forte susceptibilidade à influência do vento, o que implica a existência de soluções construtivas adequadas para que este não seja prejudicial. - Possibilidade de inversão de fluxo em condutas na presença de gradientes térmicos com temperatura exterior superior à interior ($\Delta T_{\text{int-ext}} \leq 0$). - Espaço ocupado por condutas.
Ventilação mecânica centralizada (VMC)	- Permite assegurar em contínuo as taxas de ventilação pretendidas. - Maior eficiência na extracção de poluentes na fonte (ex.: produção de humidade nas instalações sanitárias). - Reduzido espaço ocupado por condutas. - Possibilidade de recuperação de calor.	- Custo do sistema. - Consumo de energia. - Nível de ruído (só nos casos de implementação deficiente). - Custo de manutenção. - Quando desligado, a ventilação fica reduzida a valores excessivamente reduzidos. - Possibilidade de desconforto devido a correntes de ar (só se for mal implementado).
Ventilação mista: ventilação mecânica descentralizada (ventiladores em cada habitação e frequentemente só na cozinha)	- Menor consumo de energia que o sistema VMC. - No caso de funcionamento intermitente, maiores taxas de ventilação somente quando são necessárias.	- Custo do sistema (menor que no sistema VMC). - Consumo de energia (menor que no sistema VMC). - Nível de ruído (maior que no sistema VMC). - Custo de manutenção. - Espaço ocupado por condutas. - Correntemente, funcionam intermitentemente. - Possibilidade de inversão de fluxo na instalação sanitária / caldeira em caso de uso de ventilação natural nesta. - Dado não existirem normas ou métodos de cálculo bem definidos para este tipo de sistema são normalmente muito mal implementados conduzindo a situações de ventilação muito deficiente quando os ventiladores não estão em funcionamento, pelo facto das condutas de ventilação estarem obstruídas pelos ventiladores.

Relativamente à documentação e investigação portuguesa existente, destacam-se as do LNEC, entre as quais, o documento [5.1] para a ventilação mecânica e o documento [5.27] para a ventilação natural, e as da FEUP, através das teses de mestrado relativas ao diagnóstico das condições de ventilação em edifícios de habitação [5.28], à implementação da NP 1037-1: 2002 [5.29] e de sistemas híbridos [5.30].

5.4. SÍNTESE CRÍTICA

O presente capítulo pretendeu apresentar sucintamente os sistemas de ventilação correntemente usados em Portugal. Na prossecução deste objectivo, apresentaram-se alguns estudos, análise de projectos e inquéritos, que demonstraram, nomeadamente, o seguinte:

- o projecto de ventilação ainda não é prática corrente e quando existe é incipiente;
- quando existe ventilação mecânica, está é realizada maioritariamente nos compartimentos de serviço, em regime contínuo ou descontínuo;
- as habitações não têm dispositivos de admissão de ar;
- na maioria dos edifícios de habitação, o sistema instalado é, provavelmente, um sistema misto (ventilação mecânica na cozinha e ventilação natural na instalação sanitária).

Em face da popularidade e dos potenciais problemas apresentados por um sistema misto, nomeadamente, a sua intermitência e a possibilidade de inversão de fluxo nas condutas com ventilação natural, considera-se fundamental caracterizar o respectivo funcionamento. Sendo assim, o objectivo fundamental desta investigação foi o de caracterizar e optimizar um sistema misto de ventilação, avaliando as suas potencialidades e fraquezas, a qual é apresentada no §6.

BIBLIOGRAFIA DO CAPÍTULO 5

[5.1] Pinto, A., Ventilação Mecânica de Edifícios de Habitação, LNEC, NCI, Relatório 01/2006, 2006.

[5.2] Dorer, V.; Pfeiffer, A.; Weber, A., Parameters for the Design of Demand Controlled Hybrid Ventilation Systems for Residential Buildings, Technical Note 59, Annex 5-AIVC, IEA-ECBCS, 2005.

[5.3] BSI, Code of Practice for Design of Buildings. Ventilation Principles and Designing for Natural Ventilation, BS 5925, British Standards Institution, London, 1991.

[5.4] Liddament, M., A Guide to Energy Efficient Ventilation, Annex 5-AIVC, IEA-ECBCS, 1996.

[5.5] Axley, J., Residential Passive Ventilation Systems: Evaluation and Design, Technical Note 54, Annex 5-AIVC, IEA-ECBCS, 2000.

[5.6] Concannon, P., Residential Ventilation, Technical Note 57, Annex 5-AIVC, IEA-ECBCS, 2002.

[5.7] Månsson, L., Evaluation and Demonstration of Domestic Ventilation Systems. State of Art, Annex 27, IEA-ECBCS, 1995.

[5.8] CEN, Ventilation for Buildings. Design and Dimensioning of Residential Ventilation Systems, CEN/TR 14 788, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2006.

[5.9] Russel, M.; Sherman, M.; Rudd, A., Review of Residential Ventilation Technologies, Technical Report LBNL-57 730, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, USA, 2005.

[5.10] IPQ, Ventilação e Evacuação dos Produtos da Combustão dos Locais com Aparelhos a Gás. Parte 1: Edifícios de Habitação. Ventilação Natural, Instituto Português da Qualidade, NP 1037-1, Monte da Caparica, 2002.

[5.11] Decreto-Lei n.º 38 382, Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU), 7 de Agosto de 1951, Diário do Governo.

[5.12] Despacho 41/MES/85, Recomendações Técnicas para Habitação Social, 14 de Fevereiro, Diário da República, II Série, Lisboa, 1985.

[5.13] Decreto-Lei n.º 79/2006, Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização (RSECE), 4 de Abril, Diário da República, I Série-A, Lisboa, 2006.

[5.14] Decreto-Lei n.º 80/2006, Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), 4 de Abril, Diário da República, I Série-A, Lisboa, 2006.

[5.15] Portaria n.° 361/98, Regulamento Técnico Relativo ao Projecto, Construção, Exploração e Manutenção das Instalações de Gás Combustível Canalizado em Edifícios, 26 de Junho, Diário da República, I Série-B, Lisboa, 1998.

[5.16] Decreto-Lei n.º 521/99, Normas a que ficam Sujeitos os Projectos de Instalações de Gás em Edifícios e Regime Aplicável à Inspecção de Instalações, 10 de Dezembro, Diário da República, I Série-A, Lisboa, 1999.

[5.17] Portaria n.º 362/2000, Procedimentos Relativos às Inspecções e à Manutenção das Redes e Ramais de Distribuição e Instalações de Gás, 20 de Junho, Diário da República, I Série-B, Lisboa, 2000.

[5.18] Piedade, A.; Rodrigues, A., Deficiências de Ventilação na Origem de Manifestação de Humidades em Edifícios: um Caso de Estudo, Construção 2001 - 1.º Congresso Nacional da Construção, Lisboa, 2001.

[5.19] Freitas, V.; Ramos, N.; Pinto, M., Importance of Ventilation and Higroscopic Inertia in the Control of Relative Humidity in Dwellings, 8th Healthy Buildings Conference, Lisbon, Portugal, 2006.

[5.20] Corvacho, M.; Finteiro, A., Condições Efectivas de Ventilação em Edifícios de Habitação. Diagnóstico ao Nível do Projecto, Construção 2001 - 1.º Congresso Nacional da Construção, Lisboa, 2001.

[5.21] INE, Boletim Mensal de Estatística, Instituto Nacional de Estatística, Novembro, 2001.

[5.22] Pinto, M.; Freitas, V., Ventilação Natural em Edifícios de Habitação. Caracterização dos Sistemas, Revista Concreto, n.º 170, 2001.

[5.23] Pinto, M.; Freitas, V., Characterization of Natural Ventilation Systems in Residential Buildings in Portugal - The Importance of Standardization, XXX IAHS World Congress on Housing, Coimbra, Portugal, 2002.

[5.24] Pereira, S.; Vieira, J.; Paiva, A., Definição de Aspectos a Certificar em Edifícios de Habitação em Trás-os Montes e Alto Douro, Construção 2004 - 2.º Congresso Nacional da Construção, Porto, 2004.

[5.25] Blomsterberg, Å., EU project Reshyvent. Cluster Project on Demand Controlled Hybrid Ventilation in Residential Buildings with Specific Emphasis on the Integration of Renewables, WP 2: Market Support Unit. Task 2.1, CD Reshyvent, 2005.

[5.26] Pinto, M.; Viegas, J.; Freitas, V., Qualidade do Ambiente Interior em Edifícios de Habitação, Revista Engenharia e Vida, n.º 37, Julho/Agosto de 2007.

[5.27] Viegas, J., Ventilação Natural de Edifícios de Habitação, CED 4, LNEC, Lisboa, 1995.

[5.28] Finteiro, A., Diagnóstico das Condições de Ventilação em Edifícios de Habitação, Tese de Mestrado Submetida à FEUP, 1998.

[5.29] Ferreira, M., Caudais de Ventilação Recomendados para Edifícios Residenciais - Impacto ao Nível do Conforto Térmico e do Consumo de Energia para Aquecimento, Tese de Mestrado Submetida à FEUP, 2004.

[5.30] Ferreira, P., Sistemas de Ventilação Híbridos em Edifícios - Análise Energética Resultante da Implementação de Sistemas de Ventilação Inovativos, Tese de Mestrado Submetida à FEUP, 2006.

6. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL E OPTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE VENTILAÇÃO MISTO EM EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO

6.1. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO E RESPECTIVA CAMPANHA EXPERIMENTAL

6.1.1. OBJECTIVOS E ESTRATÉGIA DA CAMPANHA EXPERIMENTAL

Neste capítulo pretende-se apresentar a campanha experimental, e os respectivos resultados, levada a efeito no âmbito da presente tese. Realce-se que a campanha experimental foi apoiada por um projecto da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), projecto POCTI/ECM/45555/2002, sob a designação de "Ventilação em Edifícios de Habitação - Modelação e Experimentação In Situ", envolvendo a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), o LNEC e a Escola Superior de Tecnologia de Viseu (ESTV).

O objectivo fundamental desta investigação foi o de caracterizar o funcionamento de um sistema misto de ventilação, avaliando as suas potencialidades e fragilidades. Para concretizar este objectivo foi necessário:

- realizar um estudo experimental preliminar com o objectivo de estudar a implementação da técnica PFT na medição de renovações horárias;
- estabelecer um protocolo com o INH, actualmente IHRU (Instituto da Habitação e Reabilitação Urbana), com o objectivo deste disponibilizar um edifício habitacional onde se pudesse realizar algumas alterações na fase de construção;

- seleccionar apartamentos "tipo" do edifício em estudo com diferentes orientações e diferentes alturas em relação ao nível do solo, com o objectivo de avaliar a influência destas variáveis;
- comparar o desempenho de um sistema misto com o desempenho do sistema de referência inicialmente previsto (exclusivamente de ventilação natural);
- determinar as renovações horárias com os apartamentos desabitados, na situação de Verão e Inverno, e habitados, na situação de Inverno.

Tendo em atenção a estratégia definida, a campanha experimental teve como primeiro objectivo caracterizar os dispositivos instalados, tanto em laboratório, como *in situ*, fazendo a respectiva análise comparativa. Neste contexto, realizaram-se os seguintes ensaios em laboratório:

- quantificação do desempenho aerodinâmico da grelha auto-regulável de admissão de ar e da grelha "corrente" de extracção fixa da instalação sanitária (grelha *standard* plástica);
- quantificação da permeabilidade ao ar, estanquidade à água, resistência ao vento e resistência mecânica da janela dos quartos;
- determinação da perda de carga e coeficiente de depressão do ventilador estático.

Adicionalmente, em laboratório, também se obtiveram os coeficientes de pressão na envolvente exterior do edifício em estudo.

Quanto aos ensaios *in situ*, realizaram-se os seguintes, visando a caracterização dos dispositivos instalados e elementos construtivos:

- quantificação da permeabilidade *in situ* de janelas, portas, interiores e exterior, grelha auto-regulável e caixa de estore;
- quantificação do desempenho aerodinâmico da grelha instalada na porta exterior da cozinha e da grelha de passagem instalada nas portas da instalação sanitária e da cozinha;
- medição da permeabilidade ao ar global dos apartamentos (RPH_{50}: renovação horária obtida através do ensaio de pressurização a 50 Pa).

O segundo objectivo desta campanha era o de caracterizar o desempenho do sistema de ventilação misto instalado, o que exigiu avaliar:

- a influência do isolamento térmico da tubagem, da grelha fixa de extracção e do ventilador estático da conduta da instalação sanitária nos caudais extraídos;
- a influência do aquecimento ambiente nos caudais extraídos na conduta da instalação sanitária;
- a influência da exaustão mecânica na cozinha nos caudais extraídos na instalação sanitária;
- a influência do funcionamento simultâneo do esquentador e exaustor;
- a influência da grelha de passagem instalada nas portas da cozinha e instalação sanitária;
- a influência da grelha exterior da cozinha;
- as renovações horárias, locais e globais, recorrendo ao método dos gases traçadores, mais concretamente às técnicas PFT e do declive. Pretendia-se que estes ensaios decorressem em condições climáticas diversas, com modificações do sistema instalado e os apartamentos desabitados e habitados;
- as concentrações de CO_2 e CO numa cozinha em condições de funcionamento.

Durante todos os ensaios realizados localmente, mediram-se as condições climáticas exteriores (direcção e velocidade do vento, temperatura e humidade relativa) obtidas na cobertura do edifício (6 m acima do terraço), bem como a temperatura e humidade relativa nos apartamentos estudados. Pontualmente, mediram-se estas últimas grandezas em todos os compartimentos.

Complementarmente, também se desejava obter as condições de conforto térmico nos apartamentos, para isso determinaram-se:

- temperatura e humidade relativa em cada apartamento;
- temperatura do ar, das superfícies e humidade relativa em cada compartimento, num apartamento;

- índices *PMV* (Predicted Mean Vote) e *PPD* (Predicted Percentage Dissatisfied), em vários apartamentos.

Decidiu-se realizar a campanha experimental *in situ* em 3 fases:

- 1.ª campanha experimental: Julho e Agosto de 2005;
- 2.ª campanha experimental: Dezembro de 2005 a Março de 2006;
- 3.ª campanha experimental: Janeiro de 2007.

Em face do planeamento anterior, apresentam-se, resumidamente, no Quadro 6.1 os ensaios levados a efeito durante toda a campanha experimental.

Quadro 6.1 - Resumo dos ensaios efectuados.

Data	Parâmetros determinados	Regime de ocupação dos apartamentos
Agosto 2005 Janeiro 2006 - Fevereiro 2006	- Renovações horárias; - Caudais nas instalações sanitárias.	Desocupados
Agosto 2005 Janeiro 2006	- Condições de conforto.	Desocupados
Dezembro 2005 - Março 2006	- Análise de sensibilidade (instalação sanitária) das seguintes variáveis: isolamento térmico da conduta, perda de carga da grelha de extracção, ventilador estático e aquecimento ambiente.	Desocupados
Fevereiro 2006 - Março 2006	- Permeabilidade das grelhas auto-reguláveis; - Permeabilidade das caixas de estore; - Permeabilidade das janelas; - Permeabilidade das grelhas de passagem; - Permeabilidade das portas; - Permeabilidade global dos apartamentos (RPH_{50}).	Desocupados
Janeiro 2007	- Renovações horárias; - Concentrações de CO_2 e CO; - Condições de conforto.	Ocupados
2005 e 2006	- Permeabilidade da grelha auto-regulável; - Perda de carga da grelha de extracção da instalação sanitária; - Permeabilidade, estanquidade e resistência ao vento das janelas dos quartos; - Perda de carga e coeficiente de depressão do ventilador estático; - Coeficientes de pressão.	(Laboratório)

6.1.2. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO E DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO ENSAIADO

Na prossecução dos objectivos apresentados, seleccionou-se um edifício multifamiliar de 4 pisos, localizado em Areias - Gondomar. Este obedece ao programa de habitações a custos controlados (PER). O conjunto habitacional apresenta as seguintes características (Figura 6.1 e Figura 6.2):

- edifício com 4 pisos e 94 apartamentos;
- apartamentos do tipo T1, T2 e T3 (maioritariamente do tipo T2) com pé-direito aproximado de 2,5 m;
- apartamentos com diferentes orientações (entradas orientadas a SE, NW e NE);
- sistema de ventilação natural (solução base).

Figura 6.1 - Vista parcial do empreendimento seleccionado.

O sistema de ventilação proposto pelo projectista apresentava as seguintes características:

- admissão de ar por grelhas auto-reguláveis sob a caixa de estore a uma altura aproximada de 2 m; uma grelha por quarto e duas grelhas na sala de “módulo” 30 - caudal de referência (m^3/h) sob a diferença de pressão de 20 Pa. Não respeita o

especificado na NP 1037-1: 2002 [6.1], esta refere que o caudal de referência é de 10 Pa (ver §5);

- admissão de ar por grelha fixa na porta exterior da cozinha (confinante com varanda) instalada na zona inferior da porta com dimensões de 55×16,5 cm^2 e com três aberturas de passagem de ar (área útil de 247,5 cm^2);
- extracção da instalação sanitária com grelha fixa "corrente" plástica posicionada a aproximadamente 2,1 m do pavimento (área bruta de 15×15 cm^2 e área útil aproximada de 26 cm^2); conduta de PVC de ϕ110 nos T2 e ϕ125 nos T3, com saída de evacuação de ar a aproximadamente 1,0 m acima do nível da cobertura em terraço (lajetas de cobertura em betão);
- extracção do fogão por conduta individual metálica (ϕ150) situada a 1,95 m do pavimento com saco metálico (62×60×72 cm^3) e saída de evacuação de ar a aproximadamente 1,0 m acima do nível da cobertura (lajetas de cobertura em betão);
- extracção do esquentador (≈19,1 kW), situado junto à janela da cozinha, por conduta metálica situada a 2,25 m do pavimento e saída de evacuação de ar a aproximadamente 1,0 m acima do nível da cobertura (lajetas de cobertura em betão); conduta colectiva, sem ramais individuais, de ϕ175 para os três primeiros pisos e individual de ϕ125 para o último piso.

Os elementos que não fazendo parte directamente do sistema do sistema de ventilação, mas que, no entanto, o influenciam, apresentavam as seguintes características:

- portas dos quartos em aglomerado de madeira com vedantes de borracha nas folgas laterais e superior e folgas inferiores com altura média de 0,4 cm quando fechadas (sob a porta posicionava-se o bite de transição entre o pavimento cerâmico e o pavimento flutuante em madeira dos quartos);
- portas da cozinha e instalação sanitária em aglomerado de madeira com vedantes de borracha nas folgas laterais e superior e folgas inferiores com altura média de 0,8 cm (sem bite);

- porta principal em madeira maciça com vedantes de borracha nas folgas laterais e superior e soleira rebaixada 1 cm para o interior;
- caixa de estore em poliestireno expandido com tampa horizontal em aglomerado de madeira nos quartos e sala;
- janelas de correr (vidro simples) com 2 folhas e permeabilidade ao ar ensaiada no LNEC pertencendo à antiga classe A3 (melhor classe de permeabilidade ao ar segundo o sistema de classificação das Directivas UEAtc para Homologação de Janelas, em uso em Portugal à data do início deste estudo).

Com o intuito de se realizar uma análise comparativa entre o projectado e o especificado na NP 1037-1: 2002 [6.1], apresenta-se no Quadro 6.2 o sistema de ventilação natural dimensionado de acordo com esta norma.

Quadro 6.2 - Dimensionamento do sistema de ventilação dos apartamentos tipo T2, segundo a NP 1037-1: 2002 - Gondomar.

Compartimento/ Aparelho	Volume [m^3]	Admissão de ar [m^3/h]	Grelha de admissão de ar(1) (módulo)	Evacuação [m^3/h]	Altura da folga da porta(2) [cm]	Admissão total [m^3/h]	Evacuação total [m^3/h]	Grelha de extracção de ar (área útil) [cm^2]	Conduta de exaustão individual	Conduta colectora de exaustão
Quarto 1	22,7	22,7+**7,3**	30		1,4	110,8+**24,2** = 135				
Quarto 2	31,7	31,7**–1,7**	30		1,4					
Sala comum	56,4	56,4+**18,6**	45+30		-					
Inst. sanitárias	9,2			45	2,9(5)		138	120	ϕ125(3)	
Cozinha	23,2			93(4)	3,3(5)			-	ϕ150	
Esquentador									ϕ125(6)	ϕ230

Notas:
- 1: em face da dificuldade de encontrar no mercado grelhas com caudal nominal para 10 Pa, optou-se por utilizar grelhas com caudal nominal para 20 Pa;
- 2: largura das portas dos quartos e cozinha = 0,75 m e largura da porta da instalação sanitária = 0,70 m;
- 3: diâmetro comercial mais próximo;
- 4: o caudal necessário para o esquentador é de q = 4,3×19,1 kW = 82,1 m^3/h, menor que as 4 renovações horárias necessárias para a cozinha;
- 5: poderá optar-se por uma grelha de área fixa equivalente;
- 6: admitiu-se um diâmetro da conduta de ligação de ϕ125.

Comparando os valores da NP-1037-1: 2002, com o sistema de ventilação projectado e implementado originalmente, poderá concluir-se o seguinte:

- a admissão de ar está ligeiramente subdimensionada;
- a conduta da instalação sanitária é de secção reduzida;

- a grelha de extracção da instalação sanitária tem uma área útil inferior em cerca de 80% em relação à área recomendada (ver §6.3.1.3);
- as folgas das portas, quando fechadas, são de secção bastante reduzida;
- o dimensionamento das folgas das portas, respeitando somente a perda de carga recomendada, seria de 2,3 cm para a instalação sanitária e 2,5 cm para a cozinha, substancialmente menores que as obtidas por consulta directa dos quadros normativos;
- a conduta colectiva de exaustão do esquentador, sem ramais individuais, não é uma solução prevista/recomendável, nem a secção da conduta colectora para três pisos é suficiente;
- a entrada de ar suplementar na cozinha, através da porta exterior, não é necessária em função do sistema de ventilação conjunta implementado;
- a permeabilidade ao ar das janelas instaladas (classe A3) é melhor (inferior) à recomendada (classe A2; ver §6.3.1.2);
- a renovação horária (*RPH*) correcta, de acordo com a NP-1037-1: 2002, seria de aproximadamente 0,85 h^{-1} [135 (m^3/h) / 161,7 (m^3)], em contraponto com uma renovação horária projectada de 0,74 h^{-1}.

Sistema de ventilação modificado: sistema misto com exaustão mecânica na cozinha e ventilação natural na instalação sanitária

Em face da intenção de se implementar nos apartamentos a estudar um exaustor mecânico na cozinha (colocado na cobertura), e sabendo que a coexistência de aparelhos de combustão do tipo B (esquentadores ou caldeiras em que o ar comburente é captado directamente no local de instalação) com exaustores mecânicos não é recomendável, uma vez que este pode gerar uma importante depressão na cozinha e inverter o sentido do escoamento na conduta de evacuação natural dos produtos da combustão [6.1], a entrada de ar suplementar referida anteriormente é absolutamente necessária [6.2].

Quando há exaustão mecânica, a caracterização desta entrada de ar suplementar, a situar, preferencialmente, no local do aparelho tipo B, é especificada em vários documentos:

- na norma ASHRAE 62.2: 2007 que aconselha a sua implementação para um caudal global de extracção superior a 270 m^3/h [6.3];
- em documentação técnica da Bélgica e do Canadá que recomenda uma depressão máxima de 5 Pa [6.4]. Na Bélgica recomenda-se também uma entrada de ar de 160 cm^2 por cada 100 m^3/h de caudal a extrair (Δp = 5 Pa) e a utilização de grelhas reguláveis para permitir a obturação, quando a exaustão mecânica não estiver a funcionar [6.5].

Com exaustão mecânica e sem aparelhos do tipo B, já se encontram desenvolvidos alguns protótipos de grelhas auto-reguláveis, com abertura a pressões elevadas (30 Pa) para permitir a entrada directa de ar na cozinha, quando estão em jogo caudais de ponta [6.6]. Evita-se, assim, a admissão destes caudais pelos compartimentos principais, com potenciais problemas de sobredimensionamento das admissões de ar e conforto. Em sistemas intermitentes, aconselha-se uma grelha dimensionada para Δp = 10 Pa [6.2].

Tendo em conta o exposto, implementou-se um sistema de ventilação misto em quatro apartamentos do tipo T2 (apartamentos 1, 2, 3 e 5 com um volume de 161,7 m^3) e em dois apartamentos do tipo T3 (apartamentos 6 e 7 com um volume de 203,2 m^3), com as seguintes alterações ao sistema inicialmente previsto:

- inserção de uma nova conduta de PVC na instalação sanitária de diâmetro igual à inicial, adiante designada por modificada, isolada exteriormente com poliuretano com uma espessura aproximada de 3 cm. Instalou-se também uma grelha com baixa perda de carga e um ventilador estático na saída da conduta na cobertura;
- instalação de um exaustor mecânico na saída da conduta de extracção do fogão;
- inserção de uma grelha de passagem de ar nas portas da cozinha e instalação sanitária, dimensionada de acordo com o caudal previsível de atravessamento;
- lajetas de cobertura das condutas de exaustão distanciadas de 15 cm das condutas (≈ diâmetro da conduta) para reduzir a perda de carga à saída.

Na Figura 6.2 apresenta-se o empreendimento com a localização dos sete apartamentos seleccionados [6.7], [6.8].

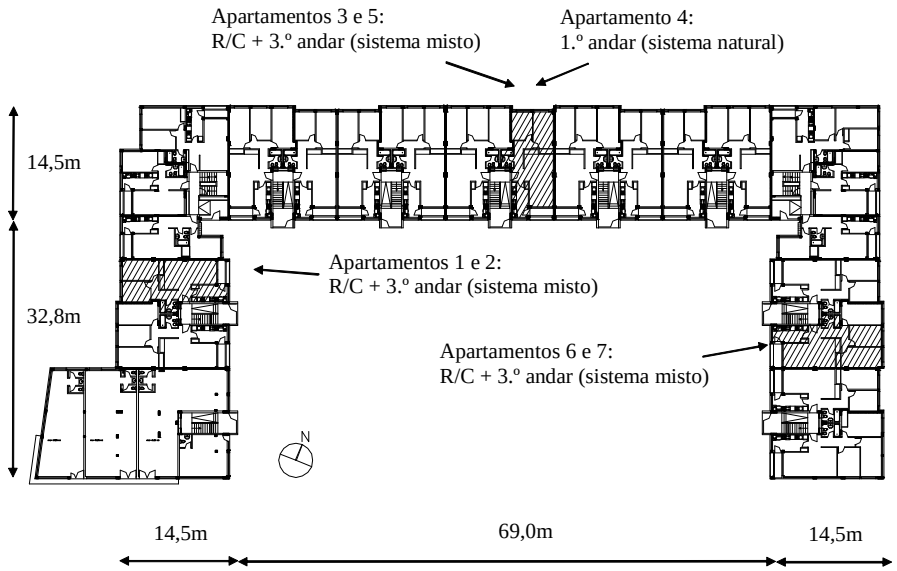
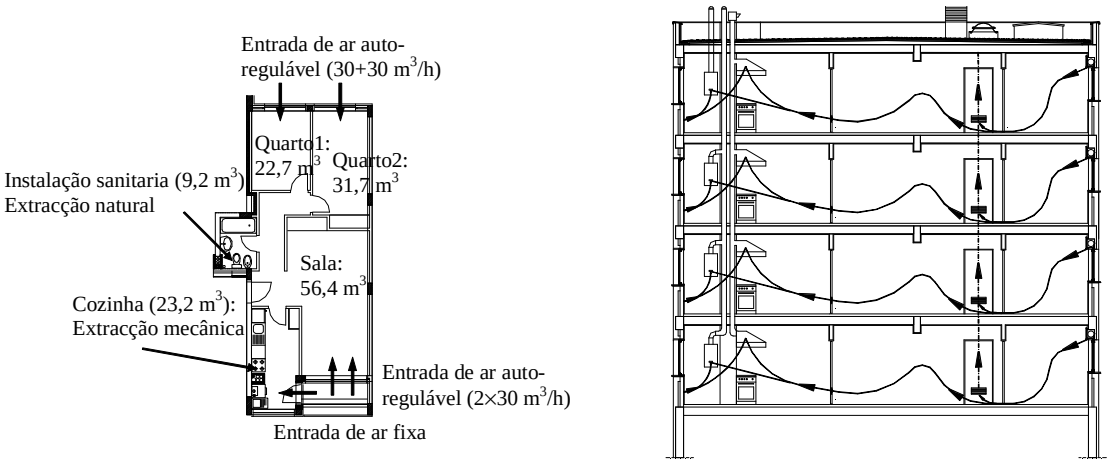


Figura 6.2 - Empreendimento contendo os sete apartamentos ensaiados [6.7], [6.8].

A Figura 6.3 mostra o apartamento tipo, bem como a localização dos vários dispositivos do sistema de ventilação [6.7], [6.8].



a) Apartamento T2. b) Fluxos previsíveis.

Figura 6.3 - Princípio de funcionamento do sistema de ventilação implementado - sistema misto [6.7], [6.8].

A Figura 6.4 mostra alguns dos dispositivos implementados nos apartamentos.

a) Ventilador estático na conduta da instalação sanitária.

b) Grelha auto-regulável instalada nos quartos e sala.

c) Grelha instalada na porta exterior da cozinha.

d) Grelha instalada na porta da instalação sanitária e cozinha.

Figura 6.4 - Dispositivos implementados.

A informação contida no Quadro 6.3 resume as características dos sistemas de ventilação implementados nos diversos apartamentos.

Quadro 6.3 - Características dos sistemas de ventilação implementados.

Apart.	Orientação	Andar	Sistema de ventilação	Conduta "modificada" da inst. sanitária(1)	Conduta "normal" da inst. sanitária	Conduta do esquentador
1	NE/SW	R/C	Misto	ϕ110	ϕ110	ϕ175 - colectiva
2		3.º	"	ϕ110	ϕ110	ϕ125 - individual
3	SE/NW	R/C	"	ϕ110	ϕ110	ϕ175 - colectiva
4		1.º	Natural	-	ϕ110	ϕ175 - colectiva
5		3.º	Misto	ϕ110	ϕ110	ϕ125 - individual
6	SW/NE	R/C	"	ϕ125	ϕ125	ϕ175 - colectiva
7		3.º	"	ϕ125	ϕ125	ϕ125 - individual

Nota:
- 1: conduta "modificada" da instalação sanitária isolada exteriormente com espuma de poliuretano (≈ 3 cm), com grelha de extracção de reduzida perda de carga ($\Delta p_{total\text{-}45m3/h}$ = 2 Pa) e ventilador estático na saída da conduta na cobertura.

6.2. ENSAIOS EXPLORATÓRIOS UTILIZANDO A TÉCNICA PFT

Face ao carácter inovador, em Portugal, da utilização da técnica PFT e à necessidade de avaliar as efectivas taxas de renovação horária de um apartamento contendo um sistema misto de ventilação correntemente utilizado, realizaram-se dois ensaios exploratórios num apartamento do tipo T2, localizado no concelho da Maia. O edifício era composto por 4 pisos (garagem + 3 pisos de habitação), localizando-se no 3.º piso o apartamento escolhido (ver alçados na Figura 6.5). As características do edifício e do sistema de ventilação estão descritas no Quadro 6.4.

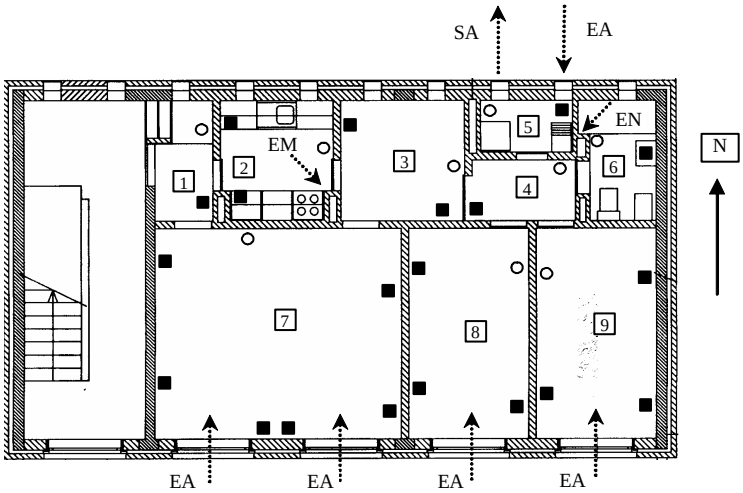
Figura 6.5 - Alçados do edifício com indicação do apartamento ensaiado - Maia.

Quadro 6.4 - Características do edifício e do sistema de ventilação.

Características	Descrição
Localização	Vila Nova da Telha - Maia
Cércea do edifício	Garagem + 3 pisos
Altura do apartamento	3.º piso
Ano de construção	2000
Tipologia do apartamento	T2 (2 quartos e corredor interior adaptado a quarto)
N.º de pessoas	1 adulto (2 adultos ao fim de semana) + 3 crianças
Sistema misto de ventilação	- Admissão de ar por grelhas auto-reguláveis na caixilharia (1 grelha por quarto e 2 grelhas na sala) de "módulo" 30 - caudal de referência (m^3/h) sob a diferença de pressão de 20 Pa; - Extracção natural na instalação sanitária (ϕ125); - Extracção mecânica local e descontínua na cozinha; - Lavandaria autoventilada (admissão/exaustão através de grelhas fixas).
Características construtivas	Sem aquecimento central; janelas de guilhotina com protecção solar interior em portadas (ambas de madeira).

Os ensaios tiveram uma duração média de 2 semanas cada um e foram realizados de 1 a 18 de Maio de 2002 e 12 a 26 de Janeiro de 2003 [6.9], [6.10].

Na figura seguinte apresenta-se a planta do apartamento com a localização da instrumentação usada e dos dispositivos de ventilação.



Legenda:

■	- cápsula emissora;	○	- cápsula receptora;
EM	- extracção mecânica;	SA	- grelha de saída de ar;
EA	- grelha de entrada de ar.	EN	- extracção natural.

Figura 6.6 - Planta do apartamento com indicação da posição do equipamento usado - Maia.

Sabendo que as grelhas de admissão garantem 120 m^3/h (para uma diferença de pressão de 20 Pa), e tendo em conta que o volume do apartamento é de 160 m^3, a taxa de *RPH* esperada seria de 0,75 h^{-1} (em média para todo o apartamento). As baixas taxas obtidas (ver Quadro 6.5) poderão ser explicadas pela relativa falta de ventilação cruzada, os vãos encontram-se praticamente numa fachada, orientados a Sul (protegidos pelo edifício adjacente), enquanto que os ventos predominantes se situaram entre os rumos NW e E. A falta do efeito de chaminé devido à pequena diferença entre a temperatura interior e exterior e o uso de uma ventilação mecânica descontínua na cozinha poderão também explicar as baixas taxas obtidas.

A maior renovação horária no mês de Maio poderá ser explicada pelos hábitos dos residentes, os quais deixavam as janelas abertas por longos períodos, ou pela maior velocidade média do vento, comparativamente ao mês de Janeiro.

Quadro 6.5 - *RPH* no apartamento e respectivas condições climáticas.

Compartimento	N.º	RPH_{local} [h^{-1}][(1)]	
		Maio de 2002	Janeiro de 2003
Hall	1	0,42	0,42
Cozinha	2	0,49	0,41
Corredor A (quarto C)	3	0,40	0,35
Corredor B	4	0,37	0,33
Lavandaria	5	0,85	0,68
Instalação sanitária	6	0,37	0,38
Sala	7	0,40	0,35
Quarto A	8	0,46	0,28
Quarto B	9	0,33	0,26
		RPH_{global} [h^{-1}][(2)]	
		0,41	0,33
Condições climáticas[(3)]			
$T_{\text{média interior}}$ [ºC]		16,0	12,2
$T_{\text{média exterior}}$ [ºC]		13,8	8,5
Vento - velocidade média [km/h]		17,5	10,6
Vento - direcção predominante		NW-31%	E-32%

Notas:
- 1: incerteza local média de 8%;
- 2: incerteza global de 12%;
- 3: as condições climáticas exteriores apresentadas foram registadas no Aeroporto de Pedras Rubras (2 km do local).

Em face dos resultados obtidos, pode-se concluir que o sistema de ventilação habitualmente usado em Portugal, sistema misto com extracção mecânica descontínua na cozinha, à luz deste exemplo, poderá apresentar taxas de renovação muito baixas, o que realça a importância do trabalho realizado no âmbito desta investigação.

6.3. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DOS ELEMENTOS CONSTITUINTES DO SISTEMA OU DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

6.3.1. ENSAIOS EM LABORATÓRIO

Os ensaios em laboratório descritos nos pontos seguintes foram realizados nas instalações do LNEC, mais propriamente no Departamento de Edifícios (Núcleo de Componentes e Instalações) e, no caso da determinação dos coeficientes de pressão e do ensaio do

ventilador estático, no Departamento de Estruturas (Núcleo de Observação de Estruturas). Simultaneamente, e para efeitos comparativos, também se apresentarão os resultados obtidos pelos respectivos fabricantes.

Realizam-se os seguintes ensaios:

- desempenho aerodinâmico da grelha auto-regulável de admissão de ar;
- desempenho aerodinâmico da grelha "corrente" de extracção das instalações sanitárias;
- desempenho da janela padrão;
- perda de carga e coeficiente de depressão do ventilador estático;
- determinação em túnel de vento dos coeficientes de pressão nas fachadas e cobertura.

6.3.1.1. Desempenho aerodinâmico da grelha auto-regulável de admissão de ar

Apresenta-se na Figura 6.7 o desempenho aerodinâmico da grelha auto-regulável de "módulo" 30 - caudal de referência [m^3/h] sob a diferença de pressão de 20 Pa (origem francesa). Estas grelhas têm que obedecer aos requisitos estabelecidos na norma NF E 51-732: 2005 [6.12]. Na mesma figura, apresenta-se a linha de tendência (polinómio de grau 6), útil no caso de modelação.

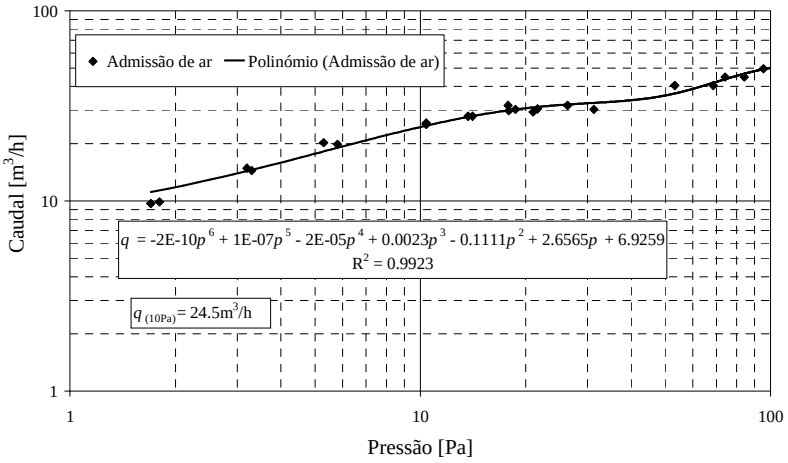


Figura 6.7 - Desempenho aerodinâmico da grelha auto-regulável.

Apresenta-se na Figura 6.8 a análise comparativa entre os resultados apresentados pelo fabricante (inclui dispositivo de protecção de fachada; protege a abertura da água da chuva) e os resultados do ensaio em laboratório. Pode-se concluir que para baixas pressões (0-20 Pa), pressões mais frequentes em sistemas de ventilação natural ou ventilação mecânica, os caudais são bastante próximos, afastando-se para a gama mais alta de pressões. O afastamento entre caudais para pressões elevadas pode resultar da perda de carga introduzida pelo dispositivo de protecção de fachada ou pelo inadequado funcionamento da membrana de regulação.

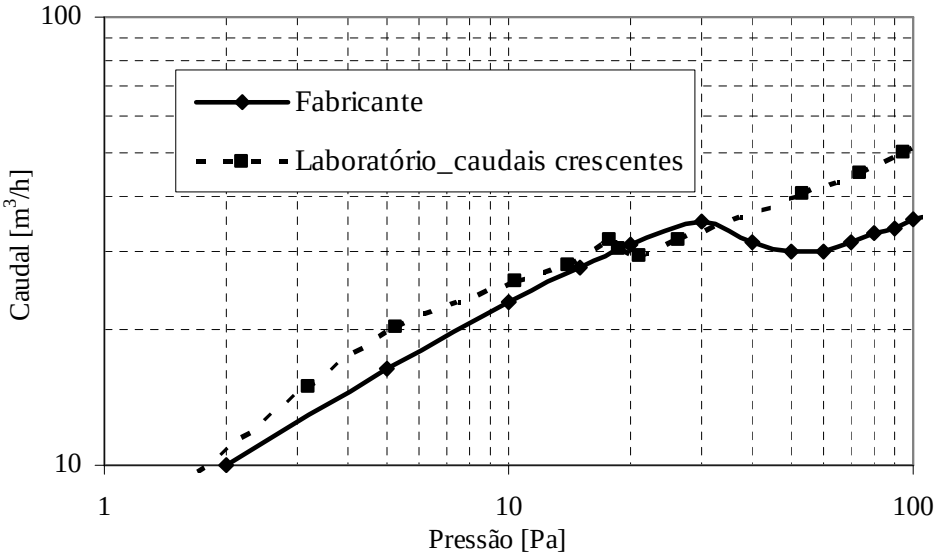


Figura 6.8 - Análise comparativa entre os desempenhos da grelha auto-regulável.

6.3.1.2. Desempenho da janela padrão

O desempenho da caixilharia exterior foi determinado em laboratório, recorrendo ao ensaio da janela de alumínio de duas folhas de correr, designada por VE4, que constituía cerca de 50% das janelas instaladas no empreendimento (instalada em todos os quartos). Realizaram-se ensaios de permeabilidade ao ar, estanquidade à água, resistência às solicitações do vento e exigências mecânicas de funcionamento (ensaios realizados sobre o protótipo do montador/caixilheiro). Na realização e interpretação dos ensaios, foram seguidas as normas europeias aplicáveis descritas em [6.13]. A janela tinha as seguintes características:

- dimensões do vão ($l \times h$): 1,80×1,00 m

- comprimento da junta móvel: 6,60 m;

- espessura do vidro simples: 4 mm.

Apresentam-se na Figura 6.9 e Figura 6.10 os resultados dos ensaios de permeabilidade ao ar em depressão (fluxo para o exterior da habitação), por serem os mais favoráveis (caudais menores).

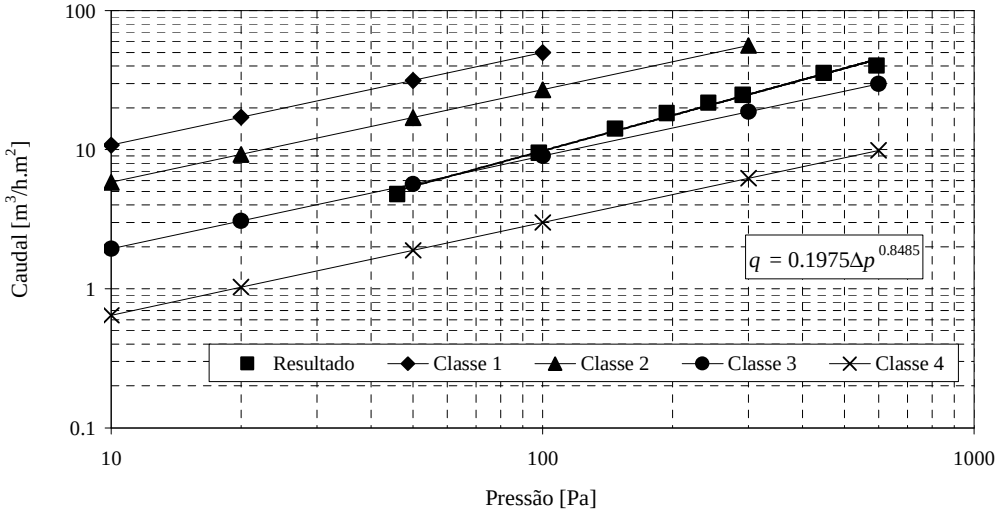


Figura 6.9 - Permeabilidade em função da área total (depressão).

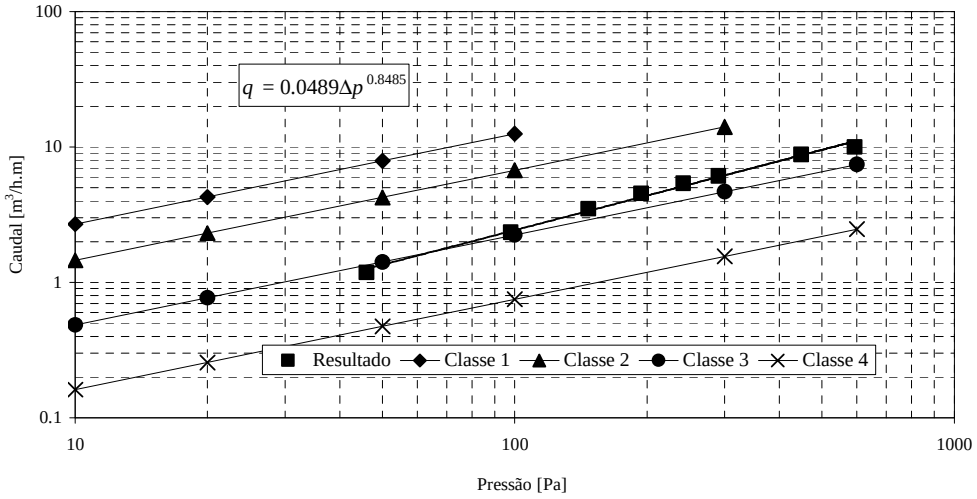


Figura 6.10 - Permeabilidade em função do comprimento da junta móvel (depressão).

De acordo com a normalização europeia [6.13], a permeabilidade da janela conduz à classe 2 (melhor classe obtida nos dois gráficos anteriores). No Quadro 6.6 resumem-se as equações obtidas em função dos ensaios de permeabilidade ao ar (resultados ajustados para as condições *standard* de 20ºC e 101,3 kPa).

Quadro 6.6 - Permeabilidade da janela padrão.

Tipo de ensaio	Caudal em função da área total [$m^3/h \cdot m^2$]	Caudal para 10 Pa [$m^3/h \cdot m^2$]	Caudal em função do comprimento da junta móvel [$m^3/h \cdot m$]	Caudal para 10 Pa [$m^3/h \cdot m$]
Pressão	$q = 0{,}8538\Delta p^{0{,}5801}$	3,2	$q = 0{,}2329\Delta p^{0{,}5801}$	0,9
Depressão	$q = 0{,}1975\Delta p^{0{,}8485}$	1,4	$q = 0{,}0489\Delta p^{0{,}8485}$	0,3

A exactidão obtida de acordo com a norma de ensaio situa-se nos 10%.

Segundo o documento [6.14], as janelas de correr ensaiadas no LNEC, em média, pertencem à classe 2. Sendo assim, a janela ensaiada enquadra-se nos valores médios obtidos no LNEC[1].

Apresenta-se no Quadro 6.7 o resumo das classificações obtidas pela janela ensaiada.

Quadro 6.7 - Resumo das classificações dos ensaios aplicados à janela padrão.

Ensaio	Classe obtida em ensaio [6.13][1]	Classe requerida pelo ITE 51 [6.15]
Permeabilidade ao ar	2	2
Estanquidade à água	3A	4
Solicitações do vento	5	3
Manobra	2	2
Deformação diagonal	3	1
Durabilidade	1	2
Notas: - 1: ensaios realizados sobre o protótipo do montador/caixilheiro.		

Comparativamente aos ensaios realizados pelo fabricante dos perfis e constantes do boletim de ensaios N.º 06/98 - NCCp do LNEC, verifica-se que os ensaios realizados sobre o protótipo do montador/caixilheiro apresentam um aumento significativo da

[1] Relativamente ao ensaio de estanquidade à água, o caixilho manteve-se estanque até à pressão de ar de 100 Pa, aos 150 Pa de pressão surgiu água em quantidade excessiva no interior através da união da tábua-de-peito e a ombreira esquerda. Quanto aos ensaios de resistência às solicitações do vento e exigências mecânicas de funcionamento, não se registaram resultados anómalos.

permeabilidade ao ar, o que revela o desfasamento entre as práticas de montagem dos dois intervenientes. Simultaneamente, o protótipo ensaiado revelou-se menos estanque à água que o original (fabricante dos perfis), pois, neste caso, manteve-se estanque até aos 100 Pa, em vez dos 150 Pa iniciais.

6.3.1.3. Desempenho aerodinâmico da grelha de extracção das instalações sanitárias

A extracção da instalação sanitária era originalmente efectuada recorrendo a uma grelha fixa "corrente" plástica (área bruta de 15×15 cm^2 e área útil aproximada de 26 cm^2). Estas grelhas são representativas da prática corrente. Apresenta-se na Figura 6.11 a configuração típica da grelha ensaiada.

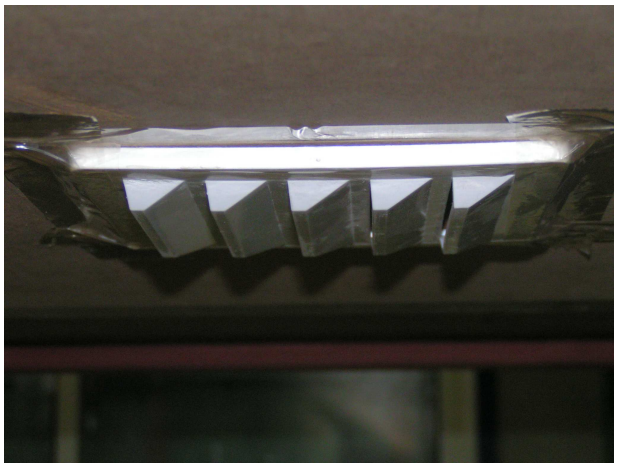


Figura 6.11 - Configuração típica da grelha de extracção das instalações sanitárias.

Os ensaios foram realizados de acordo com a norma NP EN 13141-1: 2005 [6.16] e o respectivo desempenho aerodinâmico encontra-se na Figura 6.12. A exactidão obtida é, de uma forma geral, inferior a 5% do valor medido [6.17].

O coeficiente de perda de carga da grelha ($\zeta = 2\times\Delta p/1{,}2\times[A/(q/3600)]^2$), na situação de extracção, corresponde a 2,8, o que equivale a uma perda de carga de 40 Pa para 45 m^3/h. Este valor ultrapassa largamente a perda de carga recomendada pela NP 1037-1: 2002 [6.1], 3 Pa.

Nos apartamentos com sistemas de ventilação "alterados" recorreu-se a uma grelha de extracção em alumínio injectado (origem francesa) com as seguintes dimensões: exterior = 196(l)×150(h) mm^2, interior: ϕ120mm. O desempenho aerodinâmico, de acordo com o fabricante, está definido na Figura 6.12.

O coeficiente de perda de carga desta grelha de extracção corresponde a 0,77, o que equivale a uma perda de carga de 2 Pa para 45 m^3/h. Sendo assim, não ultrapassa a perda de carga recomendada pela NP 1037-1: 2002 [6.1], 3 Pa.

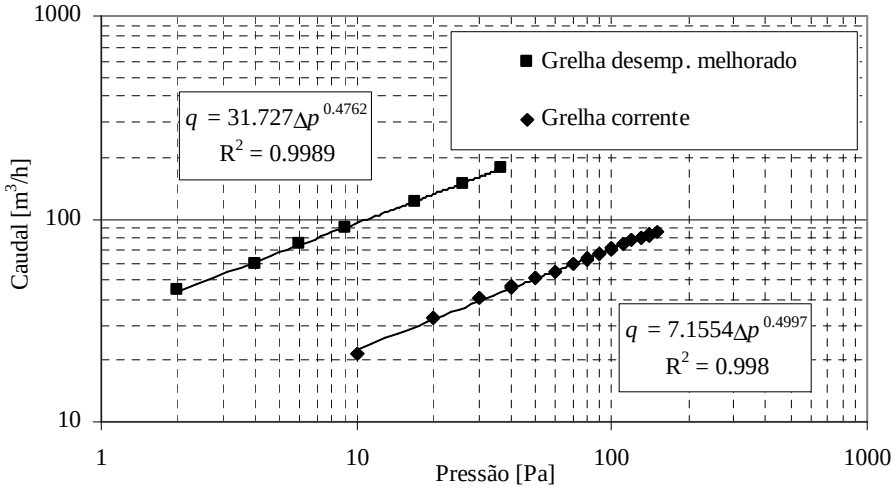


Figura 6.12 - Desempenho aerodinâmico das grelhas de extracção da instalação sanitária.

6.3.1.4. Perda de carga e coeficiente de depressão do ventilador estático

O ventilador estático de origem francesa foi ensaiado segundo a norma prEN 13 141-5:1998 [6.18]. O ensaio foi efectuado num dos túneis aerodinâmicos do LNEC (Figura 6.13). Trata-se de um túnel em circuito fechado cuja velocidade é continuamente regulável até 50 m/s. As dimensões da secção de trabalho são aproximadamente de 1,25×1,0×3,0 m^3. Os parâmetros determinados foram o coeficiente de perda de carga (ζ = 1,5; ζ do fabricante = 1,51) e o coeficiente de depressão.

Figura 6.13 - Ensaio do ventilador estático. Determinação do coeficiente de depressão para vento na direcção horizontal.

O desempenho do ventilador estático obtido pelo fabricante foi classificado segundo a norma NF P 50-413: 1993 [6.19] (norma retirada recentemente). Esta classificava os ventiladores em 2 classes e relativamente à classe B (nível Bom), nível obtido pelo ventilador em estudo, apresentava os seguintes requisitos:

- coeficiente de perda de carga, ζ, menor que 2;
- coeficiente de depressão algebricamente inferior a -0,65 para direcções do vento que façam com a horizontal ± 30º;
- coeficiente de depressão algebricamente inferior a -0,50 para direcções do vento compreendidas nos intervalos [-60º; -30º] ou [+30; +60º];
- coeficiente de depressão algebricamente inferior a 0 para outras direcções do vento.

A análise comparativa entre os dois ensaios encontra-se na Figura 6.14, da qual se pode concluir que de facto o ventilador é classificado na classe B. No entanto, os resultados obtidos em laboratório dão valores do coeficiente de depressão mais baixos (melhores).

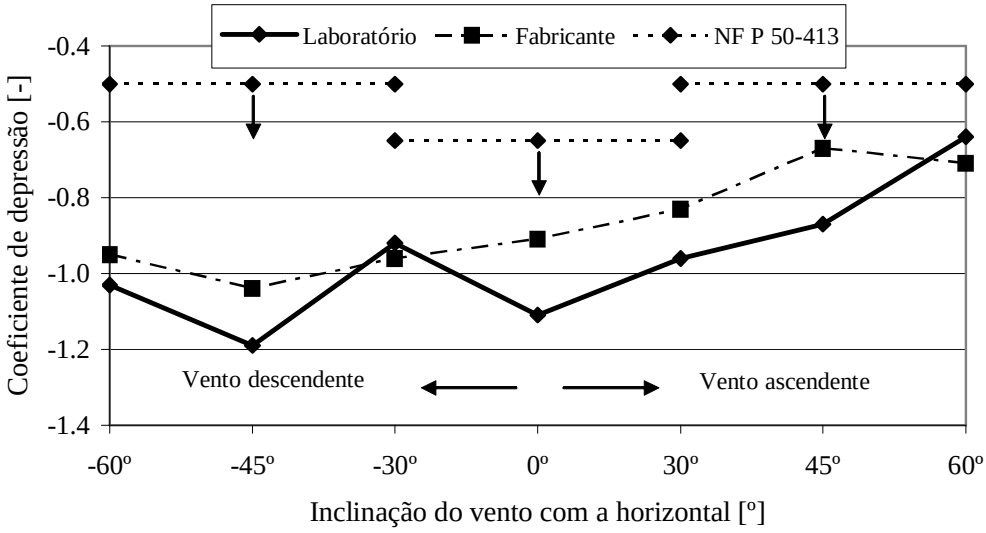


Figura 6.14 - Análise comparativa do coeficiente de depressão do ventilador estático.

6.3.1.5. Determinação em túnel de vento dos coeficientes de pressão nas fachadas e cobertura

O ensaio de determinação dos coeficientes de pressão, C_p, foi realizado no túnel já descrito no ponto anterior. Os ensaios foram executados sobre um modelo da urbanização, à escala de 1:200 (Figura 6.15), incluindo as edificações da vizinhança.

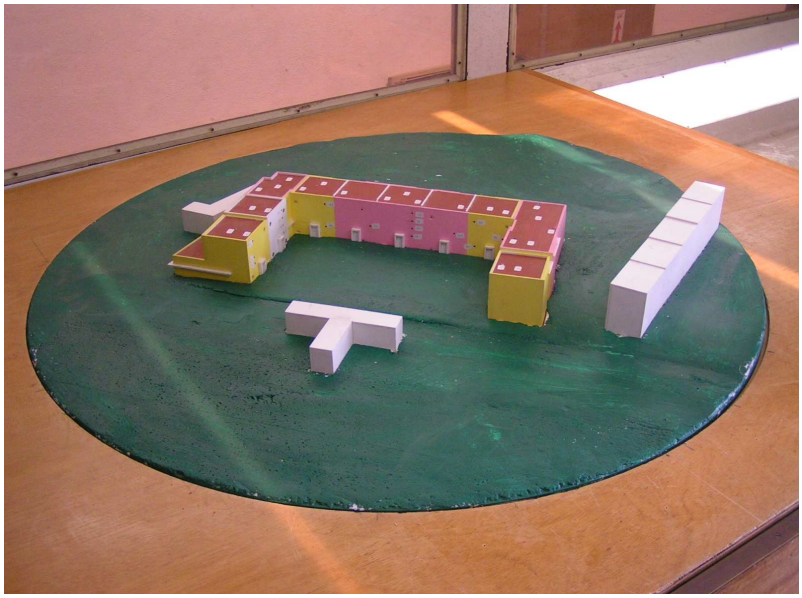


Figura 6.15 - Modelo da urbanização no túnel de vento.

O objectivo é avaliar a distribuição dos coeficientes de pressão face a uma variação do rumo do vento, pelo que se julga útil apresentar o regime de ventos local tomando por base os registos obtidos pelo Instituto de Meteorologia na Serra do Pilar (≈ 4,4 km do local), à cota de 10 m acima do nível do solo, no período que decorreu entre 1978 e 1992 (Figura 6.16).

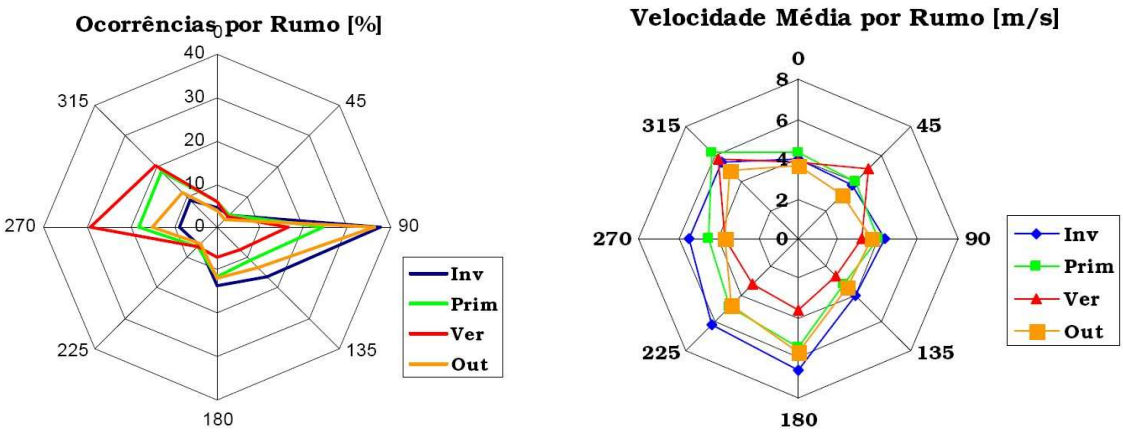


Figura 6.16 - Rosa-dos-ventos e distribuição da velocidade média do vento por rumo para a Serra do Pilar [6.20].

A forma de determinação dos coeficientes de pressão já foi apresentada no §3 e encontra-se descrita pormenorizadamente em [6.20].

Na Figura 6.17 mostra-se, a título de exemplo, o resultado obtido para uma das incidências, sendo o conjunto da totalidade dos ensaios apresentado em [6.20]. As escalas dos eixos das representações das distribuições dos valores de C_p referem-se às percentagens dos comprimentos de fachada respectivos. A negro apresentam-se os valores pontuais dos coeficientes de pressão na fachada principal, bem como a estimativa de distribuição de C_p para toda a fachada. A amarelo apresentam-se os valores pontuais dos coeficientes de pressão na fachada posterior (assinalada na planta com a mesma cor). O indicador de rumo à direita da figura indica a incidência do vento sobre a fachada.

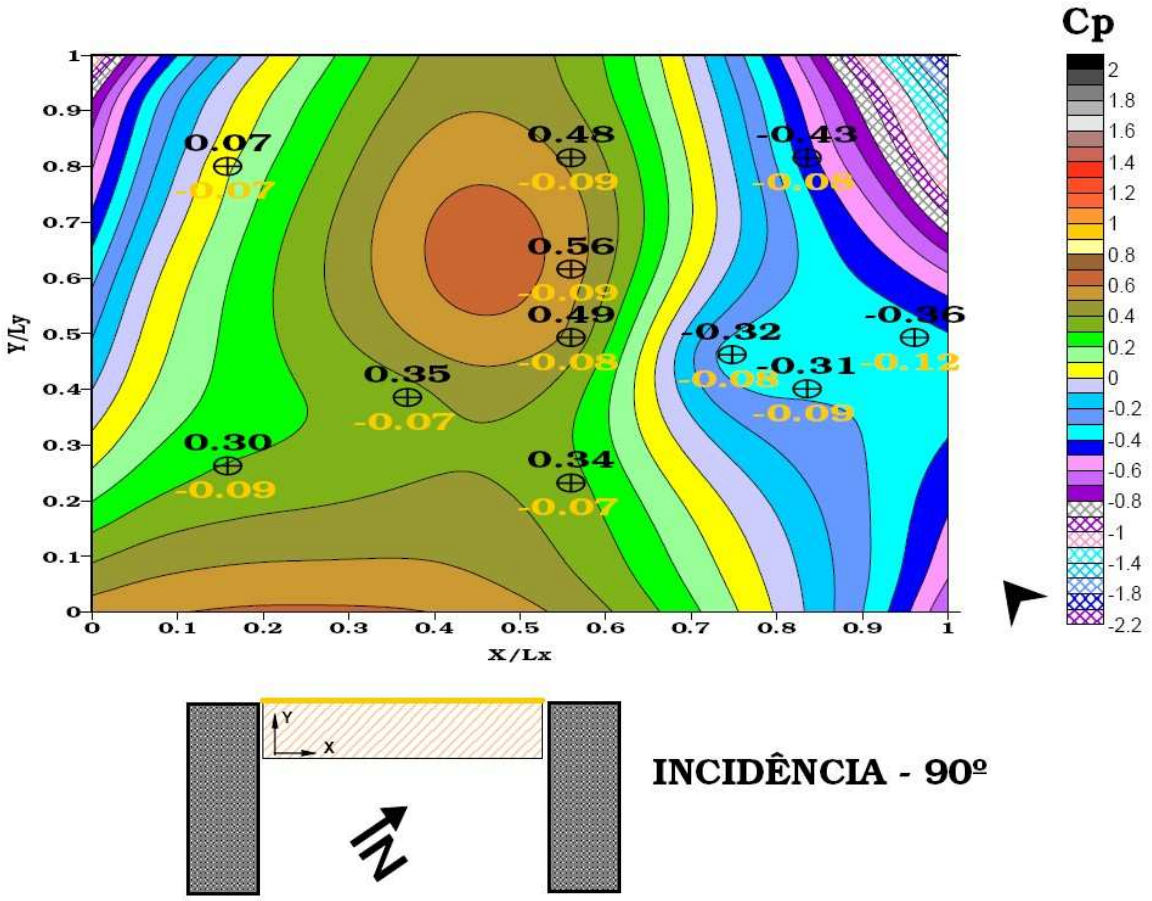


Figura 6.17 - Distribuição pontual de C_p (a preto) e contínua na fachada principal (a cores); distribuição pontual de C_p na fachada posterior (a amarelo). Edifício central, assinalado na figura inferior, para a incidência de 90º [6.20].

A principal razão que justifica a necessidade do conhecimento da distribuição de pressões na envolvente do conjunto de edifícios em estudo prende-se com a ventilação. Neste contexto, a posição da boca de saída das condutas de exaustão de produtos da combustão e da ventilação das instalações sanitárias tem particular relevância. No caso presente, para além das pressões à cota da cobertura, avaliaram-se os coeficientes de pressão para as seguintes cotas acima da cobertura: 0,0 m (a preto, ver Figura 6.18); 0,5 m (a vermelho, idem); 2,0 m (a azul, idem) e 5,0 m (a verde, idem).

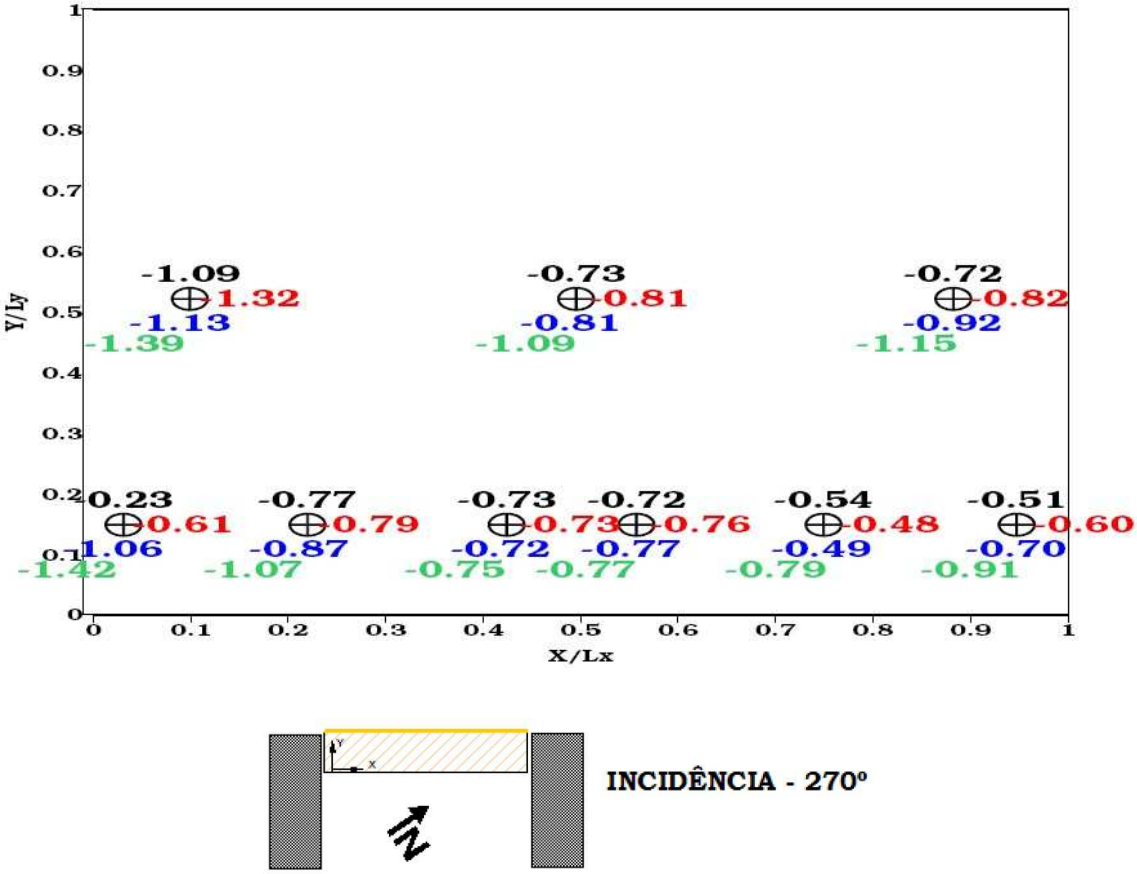


Figura 6.18 - Distribuição pontual de C_p na cobertura para o edifício central, assinalado na planta inferior, para a incidência de 270º [6.20].

A NP 1037-1: 2002 [6.1] define uma zona de recirculação[2], onde se deve evitar posicionar a boca de saída das condutas de exaustão. No caso em estudo, o posicionamento das bocas de saída não respeita a norma referida (os apartamentos 3 a 5 situam-se a meio da cobertura representada na Figura 6.18); com excepção das situações particulares, uma altura da saída das condutas a 2,0 m é compatível com um posicionamento fora das zonas de recirculação [6.20].

[2] Zona com baixas velocidades e, normalmente, sem direcção definida do vento. No interior destas zonas o poder de sucção das chaminés é diminuído.

6.3.2. ENSAIOS *IN SITU*

6.3.2.1. Condições experimentais

A caracterização da permeabilidade ao ar dos elementos da envolvente exterior, essencialmente, portas, janelas, grelhas e caixas de estore e dos elementos interiores, grelhas e portas, reveste-se de capital importância. Esta permeabilidade pode auxiliar o sistema de ventilação, como é o caso da admissão de ar no sistema de ventilação natural, ou, de modo contrário, pode dificultar ou até adulterar o funcionamento de um sistema de ventilação mecânico.

Os ensaios apresentados seguidamente, realizados de Fevereiro a Março de 2006, foram executados recorrendo a uma porta ventiladora (modelo Minneapolis Blower Door; ver Anexo C) cedida pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

A obtenção da permeabilidade de componentes recorre ao método indirecto e consiste essencialmente em obter a diferença de caudal entre duas situações distintas. Por exemplo, no caso da determinação da permeabilidade de uma janela, esta é obtida pela diferença entre uma situação inicial, em que o compartimento é pressurizado (as janelas e portas dos compartimentos adjacentes ficarão abertas), e uma segunda situação, em que a janela é vedada (selagem de todas as juntas). Em face da impossibilidade de controlo de algumas variáveis do ensaio (ex.: velocidade do vento) a incerteza obtida é provavelmente superior aos correspondentes ensaios em laboratório. No entanto, a sua principal utilidade prende-se com a possibilidade de se compararem os resultados com os obtidos em laboratório e também com os do próprio fabricante (ex.: permeabilidade das janelas).

A obtenção da permeabilidade global dos apartamentos procurou, sempre que possível, seguir a norma EN 13 829: 2000, sobre determinação da permeabilidade ao ar de edifícios. Os modos de procedimento estão descritos na referida norma e também já foram focados no §4. Segundo esta norma, a incerteza dos resultados obtidos, nomeadamente RPH_{50}, é de uma forma geral inferior a 15%. Todos os resultados foram ajustados para as condições *standard* de 293 K e 101,3 kPa de acordo com norma ASTM E 779: 2003, uma vez que

esta só faz depender o cálculo da massa volúmica da altura do local e da temperatura (dados facilmente obtidos).

Ensaiaram-se os componentes e a permeabilidade global dos apartamentos 1 a 5 e de uma forma genérica, nos resultados a seguir apresentados, entende-se por despressurização a entrada de ar exterior no apartamento. Os ensaios realizados foram os seguintes:

- desempenho aerodinâmico das grelhas de admissão de ar;
- desempenho aerodinâmico das caixas de estore;
- desempenho aerodinâmico das janelas;
- desempenho aerodinâmico das grelhas de passagem;
- desempenho aerodinâmico das portas;
- permeabilidade global dos apartamentos.

6.3.2.2. Desempenho aerodinâmico das grelhas de admissão de ar

A permeabilidade das grelhas auto-reguláveis foi determinada em conjunto (4 grelhas; Figura 6.19), o que, no caso da despressurização, terá que perfazer aproximadamente 98 m^3/h, para uma diferença de pressão de 10 Pa (Figura 6.7).

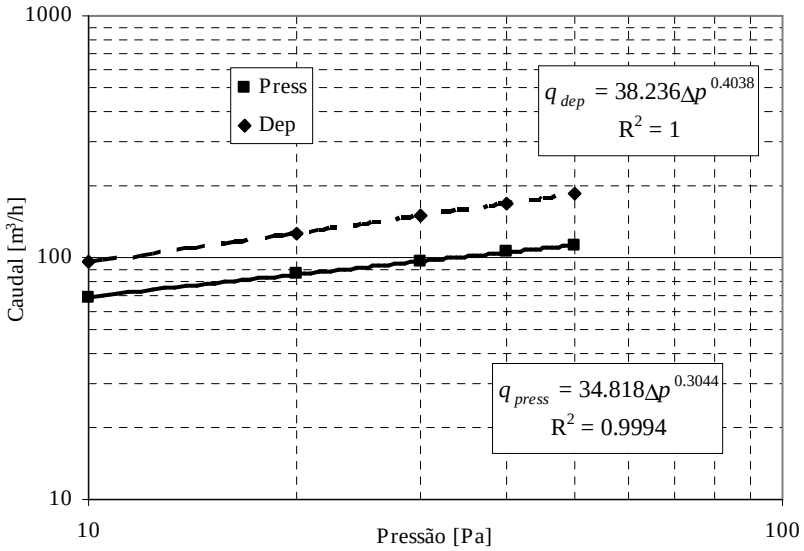


Figura 6.19 - Permeabilidade das grelhas auto-reguláveis (7 de Março de 2006).

A totalidade dos resultados dos ensaios referentes à permeabilidade das grelhas encontra-se no Quadro 6.8.

Quadro 6.8 - Permeabilidade das grelhas auto-reguláveis.

Apartamento	Data do ensaio	Tipo de ensaio	Permeabilidade [m^3/h]	Caudal para 10 Pa [m^3/h]
N.º 4	7 Março de 2006	Pressão	$q = 34{,}818\Delta p^{0{,}3044}$	70,2
N.º 4	7 Março de 2006	Depressão	$q = 38{,}236\Delta p^{0{,}4038}$	96,9
N.º 5	14 Março de 2006	Pressão	$q = 32{,}382\Delta p^{0{,}3460}$	71,8
N.º 5	14 Março de 2006	Depressão	$q = 27{,}925\Delta p^{0{,}4752}$	83,4

Da análise do Quadro 6.8, constata-se alguma variabilidade nos resultados, explicável, nomeadamente, pela variação na velocidade do vento, conforme já referido no §6.3.2.1. O caudal em depressão, para 10 Pa, situa-se ligeiramente abaixo do esperado.

Na Figura 6.20, apresenta-se a análise comparativa entre os ensaios realizados *in situ* e os realizados em laboratório, verificando-se uma proximidade para pressões inferiores a 20 Pa. No entanto, talvez pelas mesmas razões apontadas em §6.3.1.1, continua a existir alguma discrepância de resultados para pressões mais elevadas.

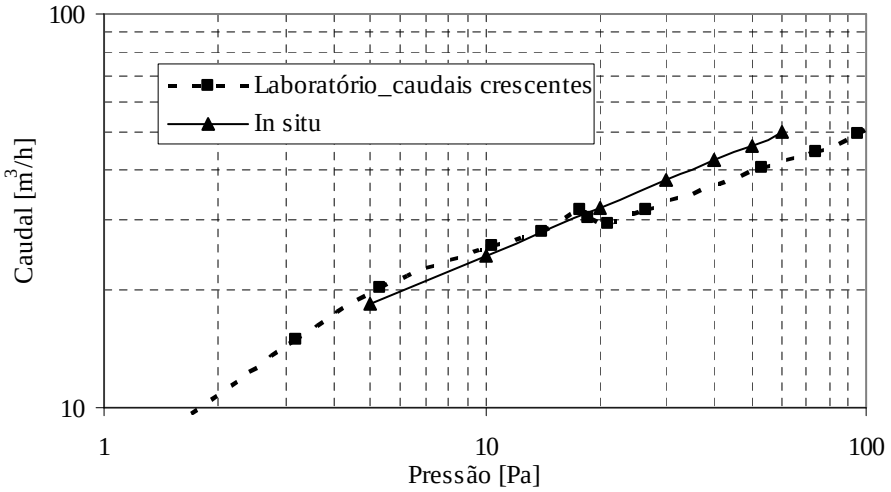


Figura 6.20 - Análise comparativa da permeabilidade de uma grelha auto-regulável (depressão, comparação para o dia 7 de Março de 2006).

6.3.2.3. Desempenho aerodinâmico das caixas de estore

A permeabilidade global das caixas de estore encontra-se apresentada no Quadro 6.9.

Quadro 6.9 - Permeabilidade das caixas de estores.

Apartamento	Data do ensaio	Tipo de ensaio	Permeabilidade [m^3/h]	Caudal para 10 Pa [m^3/h]
N.º 1	8 Fev. de 2006	Pressão	$q = 107{,}44\Delta p^{0{,}3695}$	251,6
N.º 1	7 Fev. de 2006	Depressão	$q = 81{,}117\Delta p^{0{,}5127}$	264,1
N.º 3	21 Fev. de 2006	Pressão	$q = 49{,}219\Delta p^{0{,}5755}$	185,2
N.º 3	21 Fev. de 2006	Depressão	$q = 99{,}602\Delta p^{0{,}4458}$	278,0

Como analisado no §6.3.2.7, comparativamente à permeabilidade das janelas, a permeabilidade global das caixas de estores é elevada.

6.3.2.4. Desempenho aerodinâmico das janelas

A permeabilidade das janelas, tanto em conjunto como separadamente, encontra-se apresentada no Quadro 6.10.

Quadro 6.10 - Permeabilidade das janelas.

Apartamento	Data do ensaio	Tipo de ensaio	Permeabilidade [m^3/h]	Caudal para 10 Pa [m^3/h]
N.º 1	8 Fev. de 2006	Pressão (Global)	$q = 4{,}333\Delta p^{0{,}7488}$	24,3
N.º 1	8 Fev. de 2006	Depressão (Global)	$q = 10{,}324\Delta p^{0{,}4989}$	32,6
N.º 3	21 Fev. de 2006	Pressão (Global)	$q = 7{,}576\Delta p^{0{,}4917}$	23,5
N.º 3	21 Fev. de 2006	Depressão (Global)	$q = 1{,}100\Delta p^{1{,}0015}$	11,0
N.º 4	7 Março de 2006	Pressão (Janela sala)	$q = 7{,}734\Delta p^{0{,}4028}$	19,6
N.º 4	7 Março de 2006	Dep. (Janela sala)	$q = 4{,}658\Delta p^{0{,}4088}$	11,9
N.º 5	14 Março de 2006	Dep. (Janela sala)	$q = 2{,}956\Delta p^{0{,}4971}$	9,3
N.º 5	14 Março de 2006	Pressão (Janela coz.)	$q = 1{,}481\Delta p^{0{,}6454}$	6,5

As dimensões das janelas eram as seguintes: sala = 2,7(l)×2(h) m^2, cozinha = 1,8×1,1 m^2 e quartos = 1,8×1,0 m^2. Tendo em atenção o modo de execução dos ensaios, terá que comparar-se o caudal em pressão determinado *in situ* e o caudal em depressão determinado em laboratório (§6.3.1.2), pois ambos simulam o ar a sair dos compartimentos (o mesmo raciocínio terá que ser usado para a situação inversa, ou seja, ar a entrar nos

compartimentos). No ensaio em estudo, e como analisado no §6.3.1.2, seria de esperar menor permeabilidade (caudal) para o ensaio de pressão (ar a sair do apartamento), o que somente se verifica no ensaio de 8 de Fevereiro de 2006.

Apresenta-se na Figura 6.21 a análise comparativa, por unidade de área, entre o ensaio em laboratório da janela dos quartos (VE4) e o ensaio *in situ* da janela da sala.

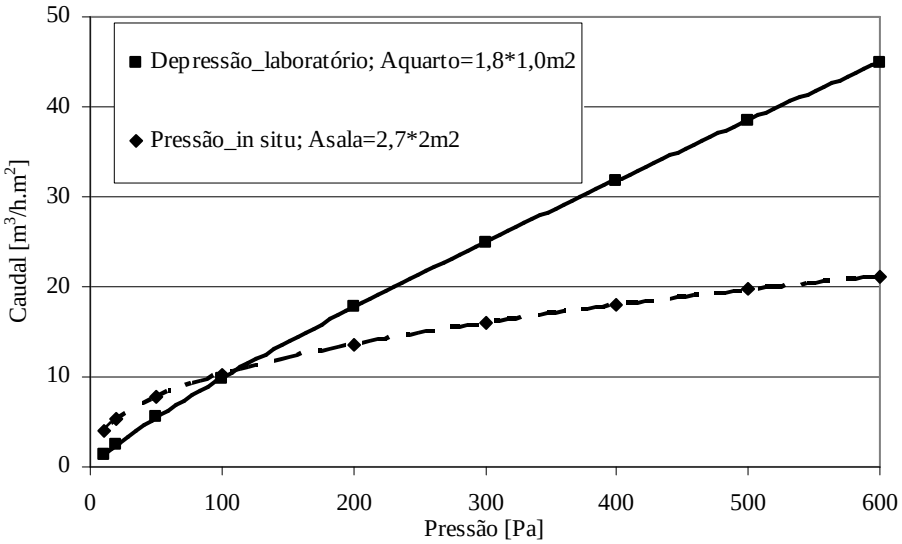


Figura 6.21 - Análise comparativa da permeabilidade da janela dos quartos, em laboratório, e da janela da sala, *in situ* (comparação para o dia 7 de Março de 2006).

Em face da discrepância de resultados, principalmente para pressões elevadas, pode-se concluir que não é recomendável a extrapolação de ensaios para janelas de dimensões superiores, conforme referido em [6.13].

6.3.2.5. Desempenho aerodinâmico das grelhas de passagem

Nas grelhas de passagem instaladas nas portas das instalações sanitárias e cozinhas utilizaram-se grelhas de origem francesa com as seguintes dimensões: interior = 380(l)×180(h) mm^2, exterior: 436×236 mm^2. De acordo com o fabricante, esta grelha tem perdas de carga de 0,8 Pa e 1,7 Pa (ζ = 7,52), respectivamente, para caudais de 70 m^3/h e 100 m^3/h.

Segundo a NP 1037-1: 2002 [6.1], as portas interiores devem possuir aberturas permanentes com perdas de carga inferiores a 1 Pa, para caudais inferiores a 60 m^3/h, e inferiores a 3 Pa para caudais superiores. Ambas as condições são respeitadas pela grelha aplicada.

A permeabilidade das grelhas de passagem encontra-se apresentada no Quadro 6.11 e Quadro 6.12 (as dimensões da grelha aplicada na porta exterior da cozinha já foram apresentadas em §6.1.2).

Quadro 6.11 - Permeabilidade da grelha aplicada na porta exterior da cozinha.

Apartamento	Data do ensaio	Tipo de ensaio	Permeabilidade [m^3/h]	Caudal para 10 Pa [m^3/h]
N.º 1	8 Fev. de 2006	Pressão	$q = 46{,}040\Delta p^{0{,}5603}$	167,3
N.º 1	8 Fev. de 2006	Depressão	$q = 93{,}315\Delta p^{0{,}3812}$	224,5
N.º 3	21 Fev. de 2006	Pressão	$q = 95{,}972\Delta p^{0{,}4014}$	241,8
N.º 3	21 Fev. de 2006	Depressão	$q = 59{,}312\Delta p^{0{,}5126}$	193,1

Quadro 6.12 - Permeabilidade da grelha de passagem aplicada nas portas da cozinha e instalação sanitária.

Apartamento	Data do ensaio	Tipo de ensaio	Permeabilidade [m^3/h]	Caudal para 10 Pa [m^3/h]
N.º 1	8 Fev. de 2006	Pressão	$q = 72{,}261\Delta p^{0{,}4210}$	190,5
N.º 1	8 Fev. de 2006	Depressão	$q = 58{,}787\Delta p^{0{,}4949}$	183,7
N.º 3	16 Fev. de 2006	Pressão	$q = 85{,}142\Delta p^{0{,}4027}$	215,2
N.º 3	16 Fev. de 2006	Depressão	$q = 82{,}626\Delta p^{0{,}4254}$	220,0

Da análise do Quadro 6.11 e Quadro 6.12, constata-se, mais uma vez, alguma variabilidade nos resultados, particularmente, não se consegue inferir se as grelhas são mais permeáveis em pressão ou depressão.

Na Figura 6.22 apresenta-se a análise comparativa entre os ensaios realizados *in situ* e os realizados em laboratório (fabricante), da grelha de passagem aplicada nas portas da cozinha e instalação sanitária, admitindo-se uma maior proximidade para as pressões mais baixas (< 10 Pa).

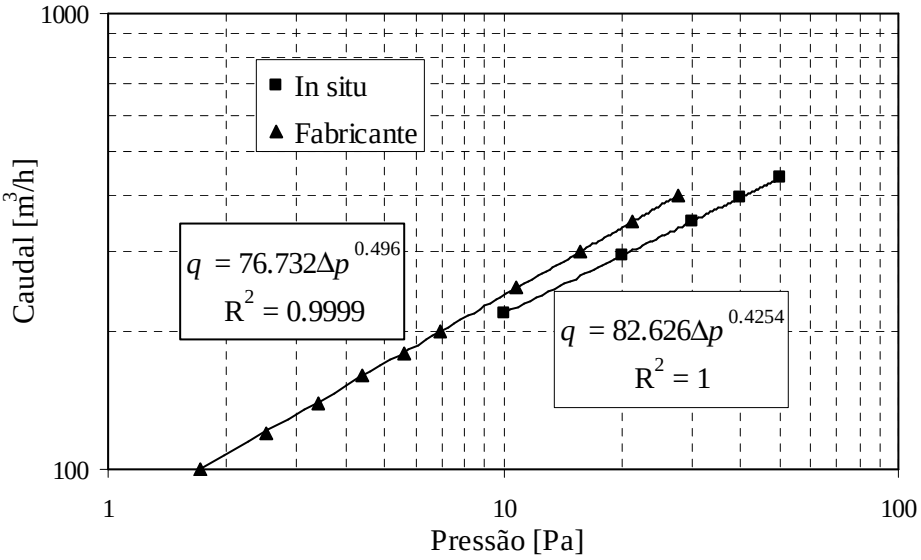


Figura 6.22 - Análise comparativa da permeabilidade da grelha de passagem aplicada nas portas da cozinha e instalação sanitária (depressão, comparação para o dia 16 de Fevereiro de 2006).

6.3.2.6. Desempenho aerodinâmico das portas

O desempenho das portas encontra-se apresentado nos quadros seguintes. As dimensões das portas eram as seguintes: interiores = 0,75(l)×2(h) m^2, exterior = 0,90×1,80 m^2. Para as portas interiores, o ensaio de depressão indica que o fluxo tem tendência a fechar a porta.

Quadro 6.13 - Permeabilidade das portas interiores aos apartamentos (quartos e cozinha).

Apartamento	Data do ensaio	Tipo de ensaio	Permeabilidade [m^3/h]	Caudal para 3 Pa [m^3/h]
N.º 4	7 Março de 2006	Pressão	$q = 21{,}856\Delta p^{0{,}4931}$	37,6
N.º 4	7 Março de 2006	Depressão	$q = 26{,}067\Delta p^{0{,}3943}$	40,2
N.º 5	14 Março de 2006	Pressão	$q = 9{,}592\Delta p^{0{,}7399}$	21,6
N.º 7	14 Março de 2006	Depressão	$q = 13{,}057\Delta p^{0{,}6024}$	25,3

Da análise do Quadro 6.13, constata-se que a permeabilidade não varia significativamente em função do sentido do fluxo (seriam de esperar maiores caudais no sentido da abertura das portas - pressão). Este resultado pode ser explicado pela reduzida permeabilidade da porta, o que leva a que o fluxo se dê essencialmente pela folga inferior.

Como já referido, as portas interiores dos quartos e sala continham vedantes de borracha, lateralmente e superiormente, e a folga interior era parcialmente obstruída por um bite de separação entre revestimentos de pisos. Os valores da permeabilidade obtidos pelas portas interiores são menores do que aqueles apresentados em bibliografia portuguesa [6.21], o que realça a necessidade de prever dispositivos de passagem, mormente, nas portas dos compartimentos de serviço.

Segundo a NP 1037-1: 2002 [6.1], a permeabilidade ao ar das portas de patamar não deve exceder o valor de 12 $m^3/(h \cdot m^2)$ para uma diferença de pressão de 100 Pa, o que neste caso daria 19,4 m^3/h. Observando o Quadro 6.14, conclui-se que este valor é largamente ultrapassado (392,4 m^3/h em depressão). Esta porta também continha os vedantes atrás descritos.

Quadro 6.14 - Permeabilidade da porta exterior do apartamento.

Apartamento	Data do ensaio	Tipo de ensaio	Permeabilidade [m^3/h]	Caudal para 100 Pa [m^3/h]
N.º 5	14 Março de 2006	Pressão	$q = 4{,}274\Delta p^{0{,}8547}$	218,9
N.º 5	14 Março de 2006	Depressão	$q = 32{,}607\Delta p^{0{,}5402}$	392,4

A permeabilidade da porta exterior da cozinha também ultrapassa largamente o valor recomendado na NP 1037-1: 2002 (158,1 m^3/h em depressão; Quadro 6.15).

Quadro 6.15 - Permeabilidade da porta exterior da cozinha.

Apartamento	Data do ensaio	Tipo de ensaio	Permeabilidade [m^3/h]	Caudal para 100 Pa [m^3/h]
N.º 1	8 Fev. de 2006	Pressão	$q = 2{,}886\Delta p^{0{,}6660}$	62,0
N.º 1	8 Fev. de 2006	Depressão	$q = 5{,}448\Delta p^{0{,}7314}$	158,1
N.º 4	7 Março de 2006	Pressão	$q = 4{,}389\Delta p^{0{,}6586}$	91,1

Em ambas as situações, os valores elevados da permeabilidade devem-se provavelmente à existência de uma folga inferior de dimensões exageradas. Para as portas exteriores da cozinha e do apartamento, o ensaio de depressão indica que o fluxo tem tendência a abrir a porta.

6.3.2.7. Permeabilidade global dos apartamentos

O ensaio de permeabilidade global dos apartamentos foi executado segundo a norma EN 13829: 2000 (efectuando a oclusão das grelhas da cozinha, instalação sanitária, porta exterior da cozinha e auto-reguláveis). Este encontra-se apresentado no Quadro 6.16.

Quadro 6.16 - Permeabilidade global dos apartamentos.

Apartamento	Data do ensaio	Tipo de ensaio	RPH_{50} [h^{-1}]
N.º 1	8 Fev. de 2006	Pressão	4,4
N.º 1	8 Fev. de 2006	Depressão	5,7
N.º 1	8 Fev. de 2006	Pressão	4,5
N.º 1	8 Fev. de 2006	Depressão	5,7
N.º 2	8 Fev. de 2006	Pressão	7,1
N.º 2	8 Fev. de 2006	Depressão	7,7
N.º 3	8 Fev. de 2006	Pressão	4,1
N.º 3	8 Fev. de 2006	Depressão	4,2
N.º 3	21 Fev. de 2006	Pressão	4,1
N.º 3	21 Fev. de 2006	Depressão	4,7
N.º 4	7 Março de 2006	Pressão	6,0
N.º 4	7 Março de 2006	Depressão	6,3
N.º 5	9 Fev. de 2006	Pressão	9,0
N.º 5	9 Fev. de 2006	Depressão	8,6
N.º 5	14 Março de 2006	Pressão	7,4
N.º 5	14 Março de 2006	Depressão	7,8
		Média	6,1

Da observação do Quadro 6.16, pode concluir-se que o valor da permeabilidade global (RPH_{50}), em cada apartamento estudado, é semelhante para o ensaio de pressão e depressão. Regista-se uma variação entre 4,4 e 9 h^{-1}, para uma média de 6,1. Estes resultados estão consentâneos com outros já apresentados em bibliografia portuguesa (variação entre 2 a 8 h^{-1} [6.14]). Em ensaios complementares, verificou-se que a permeabilidade entre apartamentos era desprezável. De acordo com a norma prEN ISO 13790: 2006, os resultados obtidos situam-se na classe média de permeabilidade ao ar.

Na Figura 6.23 apresenta-se a distribuição da permeabilidade nos apartamentos 1 e 3, da qual se pode concluir que a caixilharia apresenta um valor relativamente baixo, comparativamente com a caixa de estores. Neste caso, a preponderância da percentagem da caixa de estores é maior do que a apresentada em documentação portuguesa [6.14].

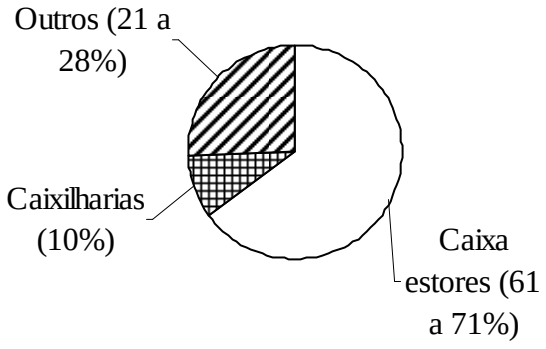


Figura 6.23 - Distribuição da permeabilidade nos apartamentos 1 e 3 (ensaios em pressão).

6.3.3. SÍNTESE CRÍTICA

Quanto à caracterização individual dos componentes e apesar da fraca fiabilidade dos resultados *in situ*, pode-se concluir o seguinte:

- de um modo geral, verifica-se que há alguma discrepância entre os resultados com origens diferentes, nomeadamente, no caso da grelha auto-regulável em que os resultados comparativos entre o fabricante e os determinados em laboratório se afastam para as pressões mais elevadas (o que para o caso da ventilação natural não é muito gravoso). O exemplo da janela dos quartos (VE4) também revela que a extrapolação de resultados do fabricante pode sobrestimar em muito o desempenho das janelas efectivamente instaladas, demonstrando a degradação da qualidade da montagem entre o produtor dos perfis e o instalador;
- a elevada permeabilidade ao ar das portas exteriores, cozinha e principal, confirmou o que era expectável, deficiente configuração da junta horizontal inferior. Em face dos requisitos da NP 1037-1: 2002 [6.1], este é um dos componentes que deverá merecer mais atenção na fase de projecto e execução. A baixa permeabilidade das portas interiores, comparativamente aos valores apresentados em bibliografia portuguesa, vem realçar a potencial restrição aos fluxos existentes num sistema de ventilação, essencialmente devido às vedações laterais e superior;

- a elevada perda de carga, obtida no desempenho da grelha "corrente" instalada na conduta de exaustão da instalação sanitária, demonstra a importância de uma boa selecção de componentes;
- os dados obtidos com a caixa de estores vêm confirmar que este é o componente com maior contribuição percentual para a permeabilidade global dos apartamentos, realçando a necessidade premente, à semelhança das portas exteriores, de incrementar o respectivo desempenho.

Quanto à permeabilidade global dos apartamentos, pode-se concluir o seguinte:

- apesar de se terem ensaiado apartamentos com as mesmas dimensões, com componentes iguais e processos construtivos iguais, a permeabilidade global apresenta uma grande variação. No entanto, o valor médio é semelhante ao apresentado em bibliografia portuguesa;
- o componente com maior contribuição para a permeabilidade global ao ar é a caixa de estores, realçando a necessidade, como já exposto, de incrementar a qualidade de projecto e execução deste componente.

A distribuição da ocorrência do vento por rumos revela que a maior parte das incidências se situa em rumos opostos, Este no Inverno e Oeste no Verão (Figura 6.16), o que, para o edifício em estudo, origina incidências oblíquas relativamente ao edifício central. Os resultados dos coeficientes de pressão para estas duas incidências revelam que [6.20]:

- para o rumo Este (incidência de 90º), as fachadas voltadas para o pátio central (expostas ao vento) têm, simplificadamente, uma distribuição simétrica: à esquerda, pressões, e à direita, sucções. As fachadas opostas têm sucções (ver Figura 6.17);
- para o rumo Oeste (incidência de 270º), as fachadas voltadas para o pátio central têm sucções. As fachadas opostas têm pressões, à excepção da fachada do edifício mais à direita.

Em face do exposto, o vento tem papéis opostos, consoante a época do ano ou a fachada em estudo, obtendo-se, genericamente, pressões, quando a fachada está exposta ao vento e

sucções, no caso contrário. Os resultados obtidos estão consentâneos com a investigação portuguesa sobre a determinação de coeficientes de pressão em edifícios em "U" [6.22].

Relativamente ao posicionamento da saída das condutas, verifica-se que a altura é insuficiente. Com excepção das situações particulares, uma altura da saída das condutas a 2,0 m é compatível com o posicionamento definido na NP 1037-1: 2002.

Seguidamente serão apresentadas as várias campanhas experimentais realizadas *in situ*. Relativamente à instrumentação usada e respectiva calibração são apresentadas nos Anexos C e D.

6.4. PRIMEIRA CAMPANHA EXPERIMENTAL: VERÃO DE 2005 - APARTAMENTOS DESOCUPADOS

6.4.1. OBJECTIVO

Conforme referido no §6.1.1, na primeira campanha experimental desenvolveram-se ensaios tendo como objectivo determinar, com apartamentos desocupados, a influência de vários componentes nos caudais extraídos nas condutas do esquentador, fogão e instalação sanitária, tais como:

- funcionamento simultâneo do aparelho tipo B e da exaustão mecânica;
- grelha de passagem instalada nas portas da cozinha e instalação sanitária;
- grelha exterior da cozinha;
- grelha fixa de extracção e do ventilador estático da conduta da instalação sanitária.

Obtiveram-se também as renovações horárias, locais e globais, recorrendo ao método dos gases traçadores, mais concretamente à técnica PFT.

6.4.2. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO FUNCIONAMENTO DO ESQUENTADOR E EXAUSTÃO MECÂNICA

De forma a aquilatar da influência do funcionamento do esquentador (com saída de água quente na instalação sanitária), em simultâneo ou não com o exaustor mecânico da cozinha (instalado na conduta do fogão), realizaram-se vários ensaios, nos dias 19 e 20 de Julho de 2005, que tiveram como objectivo determinar os caudais obtidos e temperaturas em cada conduta (esquentador, exaustor e instalação sanitária) e a temperatura e humidade relativa nos vários compartimentos do apartamento 1. Simultaneamente, modificaram-se as condições de circulação do ar interior, tais como: portas interiores fechadas/abertas, grelhas das portas da instalação sanitária e cozinha fechadas/abertas e grelha exterior da cozinha fechada/aberta.

As condições de registo das variáveis foram as seguintes:

- temperatura e humidade relativa exteriores: registos espaçados de um minuto (sondas de referência Rotronic);
- velocidade e direcção do vento: médias de dois minutos de registos espaçados de seis segundos (dados obtidos 6 m acima da cobertura, sobre o apartamento 5; equipamento de referência Young);
- temperatura e humidade relativa interiores, medidas no centro dos compartimentos: registos espaçados de um minuto (sondas de referência Rotronic);
- temperatura e velocidade nas condutas: médias de dois minutos de registos espaçados de cinco segundos (termoanemómetros de referência Airflow, anemómetros de turbina de referência Ahlborn e termopares tipo T e J).

No Quadro 6.17 apresentam-se resumidamente os ensaios levados a efeito na análise de sensibilidade apresentada.

Quadro 6.17 - 1.ª campanha: análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica. Resumo dos ensaios efectuados.

Ref.	Exaustor activado	Esquentador activado	Portas interiores abertas	Grelha exterior da cozinha aberta	Grelhas interiores de passagem abertas	Inst. sanitária com conduta modificada
Dia 19/07/2005						
A	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
B	Não	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
C	Não	Sim	Não	Não	Sim	Sim
D	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Dia 20/07/2005						
E	Sim	Sim	Não	Não	Não	Sim
Dia 20/07/2005						
F	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
G	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Dia 20/07/2005						
H	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Não

Os ensaios serão apresentados por ordem cronológica. A evolução da temperatura e humidade relativa no interior do apartamento, para cada ensaio, encontra-se no Anexo B. As condições do primeiro ensaio encontram-se descritas no Quadro 6.18.

Quadro 6.18 - 1.ª campanha: análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica. Ensaio com exaustor desactivado e esquentador activado (ventilação natural).

Horas (Ensaio)	Condições de ensaio (19/07/2005)
11:06 (A)	- Exaustor colocado mas desactivado; - Esquentador activado (água quente na instalação sanitária); - Portas interiores abertas (grelhas interiores de passagem abertas); - Grelha exterior da cozinha aberta; - Instalação sanitária com conduta modificada.
11:21	- Fim do ensaio.
11:24 (B)	- Portas interiores fechadas.
11:39	- Fim do ensaio.
11:41 (C)	- Grelha exterior da cozinha fechada.
11:56	- Fim do ensaio.
11:57 (D)	- Portas interiores abertas.
12:13	- Fim do ensaio.

Os caudais registados nas várias condutas, bem como a velocidade do vento, são apresentados na Figura 6.24, donde se pode concluir que a posição das portas ou a abertura/fecho da grelha exterior da cozinha não interferem sensivelmente nos caudais em jogo (o fecho da grelha exterior da cozinha leva a um ligeiro decréscimo dos caudais). É de realçar que, se a permeabilidade da envolvente fosse mais reduzida, provavelmente, a posição das portas e o fecho da grelha exterior teriam uma influência maior.

Do mesmo gráfico, também se pode concluir que a influência da velocidade do vento ao nível do R/C é preponderante para o incremento dos caudais nas condutas do fogão e instalação sanitária (situação de ventilação natural). A direcção predominante situou-se nos octantes E-SE (83% dos registos). Apesar da acção do vento, os caudais extraídos nestes dois compartimentos são bastante reduzidos, ao contrário do caudal extraído pela conduta do esquentador. Em termos médios, temos aproximadamente um caudal extraído de $75_{esq.}+20_{wc}+20_{fogão} = 115\ m^3/h$, o que conduz a cerca de 0,7 *RPH* (4 *RPH* na cozinha e 2 *RPH* na instalação sanitária). Para a situação de esquentador parado (período inicial do ensaio), pode-se deduzir que, em termos médios, temos aproximadamente um caudal extraído de $40_{esq.}+20_{wc}+20_{fogão} = 80\ m^3/h$, o que conduz a cerca de 0,5 *RPH* (3 *RPH* na cozinha e 2 *RPH* na instalação sanitária). Sem a conduta do esquentador teríamos na globalidade somente 40 m^3/h (0,3 *RPH*). Os caudais extraídos no fogão (caudais semelhantes aos da instalação sanitária, apesar do diâmetro da conduta do fogão ser bastante superior) foram obtidos com o exaustor colocado o que realça a perda de carga deste dispositivo, quando parado, e a respectiva significativa restrição dos caudais extraídos.

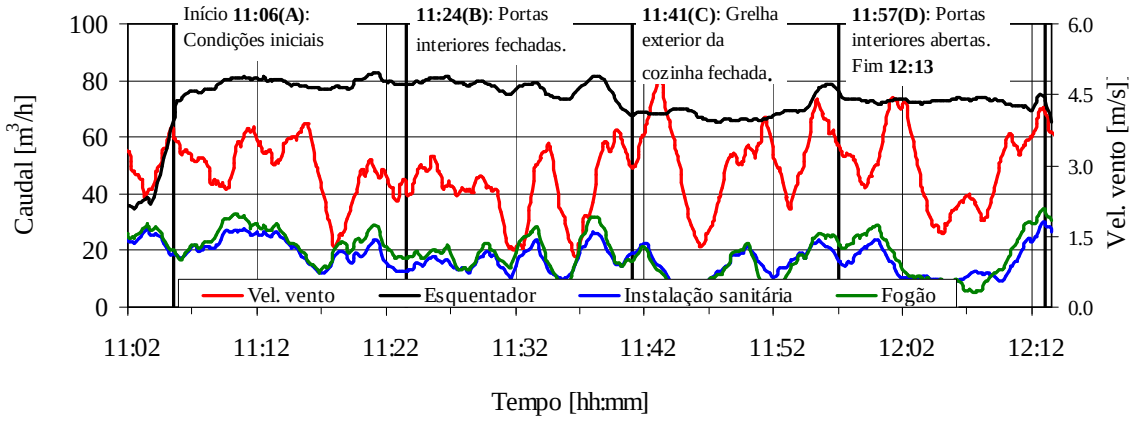


Figura 6.24 - 1.ª campanha: análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica. Caudais e velocidade do vento para os ensaios com exaustor desactivado e esquentador activado (ventilação natural).

As condições do segundo ensaio encontram-se descritas no Quadro 6.19.

Quadro 6.19 - 1.ª campanha: análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica. Condições do ensaio com exaustão mecânica (tudo fechado).

Horas (Ensaio)	Condições de ensaio (20/07/2005)
12:32	- Exaustor colocado; - Portas interiores fechadas; - Grelhas interiores de passagem fechadas; - Grelha exterior da cozinha fechada; - Instalação sanitária com conduta modificada.
12:34	- Activação do esquentador (água quente na instalação sanitária).
12:38 (E)	- Activação do exaustor.
12:43	- Incremento da velocidade do exaustor.
12:47	- Incremento do exaustor (houve variações no exaustor entre as 12h50m e as 12h55m).
12:55	- Fim do ensaio (o esquentador parou por activação do dispositivo de segurança).

Os caudais registados nas várias condutas, bem como a velocidade do vento, são apresentados na Figura 6.25, donde se pode concluir que a exaustão do fogão interfere com o caudal extraído no esquentador (picos opostos). Do mesmo gráfico, também se pode concluir que não se faz sentir a influência da velocidade do vento ao nível do R/C (situação de ventilação mecânica) e que os caudais extraídos na instalação sanitária são baixos,

caudal médio de 10 m^3/h (1 *RPH*), relativamente à situação de ventilação natural (primeiro ensaio), e sofrem uma ligeira influência do exaustor.

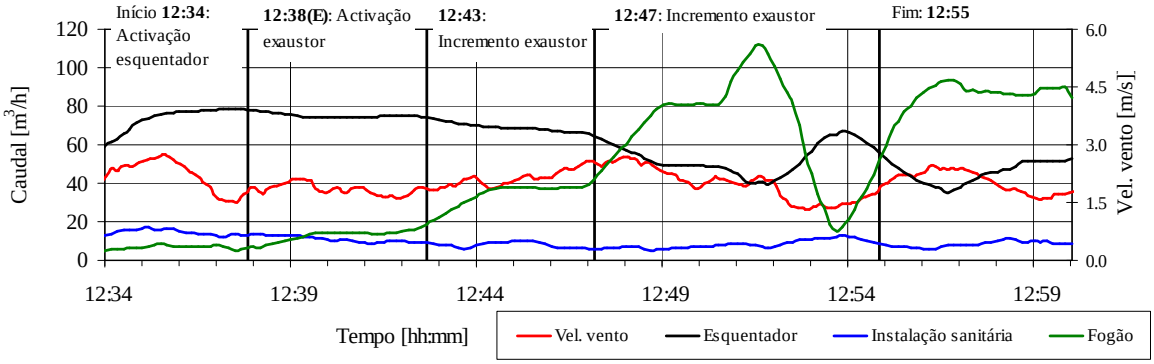


Figura 6.25 - 1.ª campanha: análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica. Caudais e velocidade do vento para o ensaio com exaustão mecânica (tudo fechado).

Na Figura 6.26 pode observar-se o momento provável da paragem do esquentador por activação do dispositivo de segurança (≈12h:57m) onde se observa simultaneamente um caudal mínimo de extracção e o início da descida da temperatura na respectiva conduta (provável entrada de ar novo exterior). Segundo a NP EN 297: 1998 [6.23], o tempo máximo até à paragem do esquentador é de 2 ou 8 minutos, consoante estivermos na presença, respectivamente, de uma obstrução completa ou uma obstrução parcial. Neste caso, em face do tempo de funcionamento do exaustor com caudais mais elevados (≈12h49m - 12h57m), a extracção da conduta do fogão funciona como uma obstrução parcial. Sendo assim, pode-se concluir que a obstrução da alimentação da admissão de ar do esquentador em conjunto com a extracção no fogão são fortes contributos para o funcionamento anómalo do esquentador (a situação apresentada assemelha-se bastante a anomalias registadas frequentemente em edifícios habitacionais).

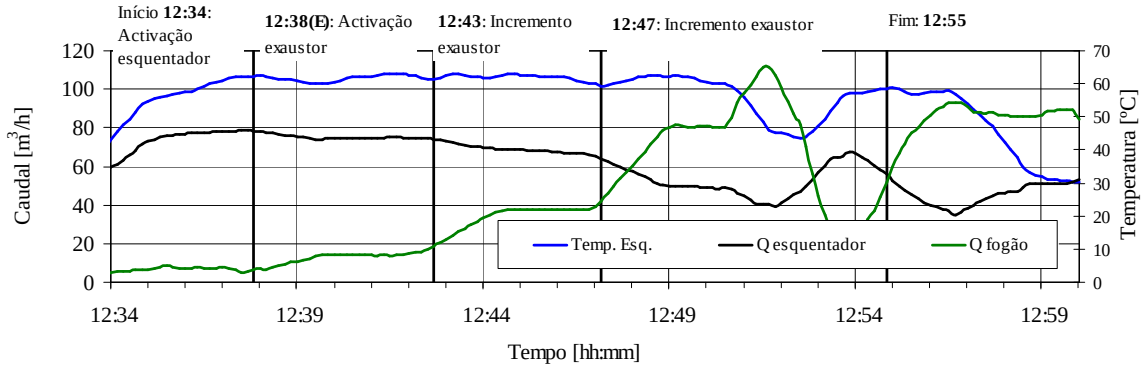


Figura 6.26 - 1.ª campanha: análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica. Caudais e temperatura do esquentador para o ensaio com exaustão mecânica (tudo fechado).

As condições do terceiro ensaio encontram-se descritas no Quadro 6.20.

Quadro 6.20 - 1.ª campanha: análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica. Condições dos ensaios com exaustão mecânica (tudo aberto).

Horas (Ensaio)	Condições de ensaio (20/07/2005)
13:02 (F)	- Exaustor colocado; - Esquentador activado (água quente na instalação sanitária); - Portas interiores abertas (grelhas interiores de passagem abertas); - Grelha exterior da cozinha aberta; - Instalação sanitária com conduta modificada.
13:08	- Exaustor parado.
13:13 (G)	- Activação do exaustor.
13:17	- Exaustor em funcionamento.
13:22	- Incremento da velocidade do exaustor.
13:26	- Incremento da velocidade do exaustor.
13:31	- Incremento da velocidade do exaustor.
13:35	- Incremento da velocidade do exaustor.
13:39	- Incremento da velocidade do exaustor.
13:42	- Incremento da velocidade do exaustor.
13:46	- Incremento da velocidade do exaustor.
13:50	- Fim do ensaio.

Os caudais registados nas várias condutas bem como a velocidade do vento são apresentados na Figura 6.27, donde se pode concluir que na posição de tudo aberto (portas interiores e grelha exterior da cozinha abertas) o incremento acentuado do caudal extraído pelo exaustor (caudal máximo aproximado de 350 m^3/h) interfere ligeiramente com o

caudal extraído pelo esquentador (decréscimo ao longo do tempo). Do mesmo gráfico, também se pode concluir que não se faz sentir a influência da velocidade do vento ao nível do R/C (situação de ventilação mecânica) e que os caudais extraídos na instalação sanitária são baixos, caudal médio de 10 m^3/h, relativamente à situação de ventilação natural (primeiro ensaio).

Uma análise comparativa entre os dois últimos ensaios revela que existe maior interferência do exaustor nos caudais do esquentador e da conduta da instalação sanitária na situação de tudo fechado (segundo ensaio). No terceiro ensaio, o esquentador, embora reduza o caudal extraído, não chega a activar o dispositivo de segurança. Neste caso, temos um caudal no exaustor cerca de três vezes maior do que no segundo ensaio, o que realça a importância das condições de admissão de ar para o esquentador. Comparando os três ensaios, conclui-se que a acção do vento só é significativa no caso do sistema somente com ventilação natural (primeiro ensaio).

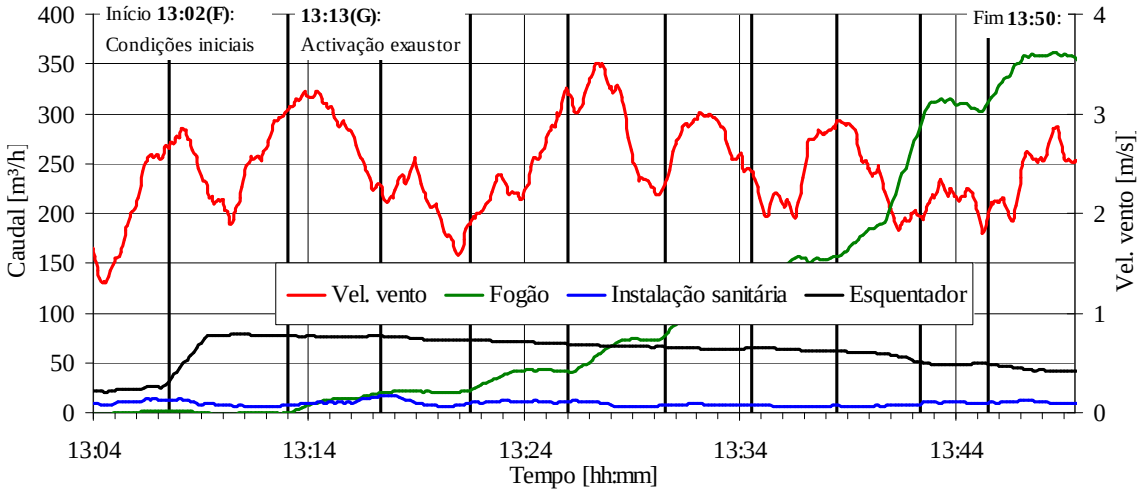


Figura 6.27 - 1.ª campanha: análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica. Caudais e velocidade do vento para os ensaios com exaustão mecânica (tudo aberto).

As condições do quarto ensaio encontram-se descritas no Quadro 6.21.

Quadro 6.21 - 1.ª campanha: análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica. Ensaio com exaustor e esquentador desactivados (ventilação natural).

Horas (Ensaio)	Condições de ensaio (20/07/2005)
14:00 (H)	- Exaustor colocado mas desactivado; - Esquentador desactivado; - Portas interiores abertas (grelhas interiores de passagem abertas); - Grelha exterior da cozinha aberta; - Instalação sanitária com conduta normal.
15:03	- Fim do ensaio.

Os caudais registados nas várias condutas bem como a velocidade do vento são apresentados na Figura 6.28. À semelhança do primeiro ensaio (condições de ventilação natural), também se pode concluir que a influência da velocidade do vento ao nível do R/C é preponderante para o incremento dos caudais na conduta do fogão. A direcção predominante situou-se nos octantes SW-W (81% dos registos). No entanto, na instalação sanitária, talvez devido à ausência do ventilador estático, os caudais não sofrem o mesmo incremento devido à velocidade do vento. Em termos médios, os caudais extraídos no fogão e na instalação sanitária são ligeiramente inferiores aos do primeiro ensaio (neste caso 10 m^3/h). O caudal extraído na conduta do esquentador apresenta um patamar, o que representa uma situação anómala (o anemómetro de turbina provavelmente estaria parado - caudais reduzidos). No entanto, pode-se apontar um caudal médio de 40-60 m^3/h, deduzido do início do primeiro e segundo ensaios.

Em termos médios, temos aproximadamente um caudal extraído de $50_{esq}+10_{fogão}+10_{wc} = 70$ m^3/h, o que conduz a cerca de 0,4 renovações por hora (3 *RPH* na cozinha e 1 *RPH* na instalação sanitária), substancialmente menor que as 0,7 *RPH* obtidas no primeiro ensaio com esquentador ligado. Realce-se que os caudais extraídos no fogão foram obtidos com o exaustor colocado.

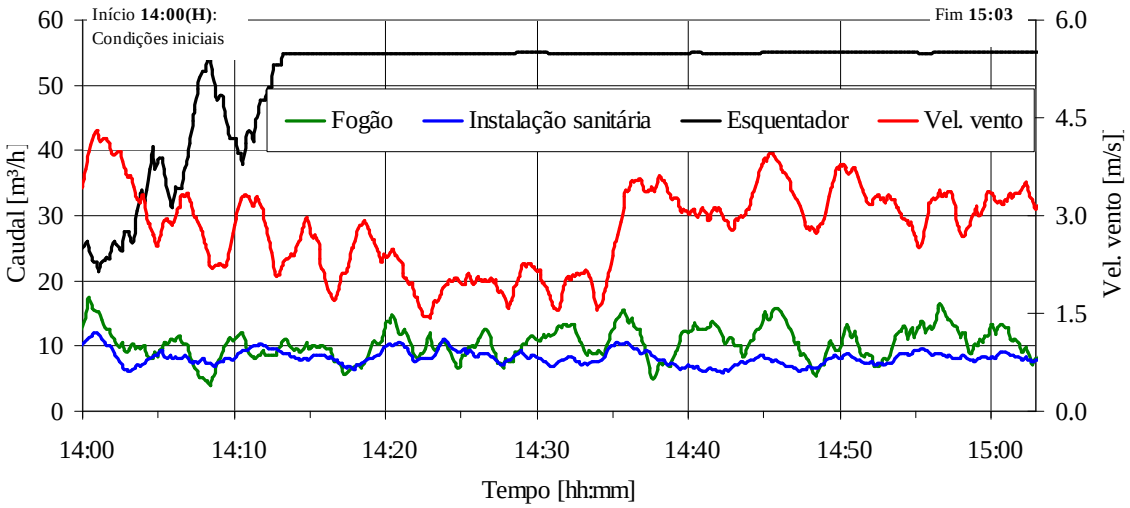


Figura 6.28 - 1.ª campanha: análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica. Caudais e velocidade do vento para o ensaio com exaustor e esquentador desactivados (ventilação natural).

Adicionalmente aos ensaios apresentados, também se realizaram outros, recorrendo ao funcionamento simultâneo de 2 esquentadores (R/C e 1.º andar com conduta comum) e exaustor na conduta do R/C, tendo-se registado novamente uma influência negativa do exaustor nos caudais extraídos no fogão e instalação sanitária. A posição da grelha exterior da cozinha também foi preponderante [6.24].

Síntese crítica

Quanto à posição dos dispositivos (portas e grelhas de passagem) e colocação do ventilador estático, pode-se concluir o seguinte:

- o fecho das portas interiores da cozinha e instalação sanitária, independentemente da existência ou não de grelhas de passagem nas respectivas portas, é fundamental para evitar a dispersão do vapor de água e calor gerados nos respectivos compartimentos (ver Anexo B; conclusão semelhante também é apresentada em [6.21] e [6.25]);
- para o caso da ventilação natural, a posição das portas e da grelha exterior não influencia sensivelmente os caudais extraídos (conclusão divergente das apresentadas em [6.21] e [6.25]);

- para o caso da exaustão mecânica na cozinha, a grelha exterior da cozinha pode ser um bom auxiliar da extracção do esquentador e pode ter obviado a inversões de fluxo na instalação sanitária;
- o ventilador estático na conduta da instalação sanitária pode ser um bom auxiliar na extracção dos respectivos caudais.

Quanto à influência do exaustor, pode-se concluir o seguinte:

- o exaustor desactivado reduz significativamente os caudais extraídos pela respectiva conduta;
- na posição de tudo fechado (grelhas e portas), o exaustor em funcionamento interfere com os caudais extraídos no esquentador e existe a possibilidade de paragem deste por activação do dispositivo de segurança. Os caudais extraídos na instalação sanitária são menores do que na situação de ventilação natural.

Conclusões idênticas acerca do funcionamento do exaustor também são apresentadas em [6.24] e [6.26]. Resultados equivalentes foram simulados em [6.26] e [6.27] para o caso do funcionamento de um ventilador mecânico numa conduta colectiva e para o caso da instalação de extracção mecânica na conduta da instalação sanitária.

Quanto à influência da velocidade do vento, pode-se concluir o seguinte:

- no caso da ventilação natural, a velocidade do vento tem influência preponderante, pelo menos no R/C, na extracção das condutas do fogão e instalação sanitária (ver também [6.28]);
- no caso da exaustão mecânica, a influência da velocidade do vento é reduzida.

No que diz respeito aos caudais e renovações horárias obtidas, pode-se concluir o seguinte:

- no caso da ventilação natural, os caudais extraídos são baixos, aproximadamente 0,40-0,50 *RPH* (com o exaustor colocado, o esquentador parado e sem ventilador estático). No caso de funcionamento do esquentador e com ventilador estático, regista-se um incremento dos caudais extraídos, aproximadamente 0,70 *RPH*;

- os caudais médios extraídos na instalação sanitária são bastante reduzidos (10-20 m^3/h; ver também [6.28]);
- no caso da exaustão mecânica, os caudais extraídos no esquentador e instalação sanitária são influenciados por aquela.

6.4.3. RENOVAÇÕES HORÁRIAS

Nesta primeira campanha experimental pretendia-se também caracterizar as condições de ventilação de apartamentos do tipo T2[3] desocupados, com um sistema de ventilação modificado. Seis apartamentos estavam equipados com um sistema misto (exaustão contínua na cozinha, com dois regimes de ventilação, e extracção natural na instalação sanitária). O sétimo apartamento (n.º 4) estava equipado com um sistema exclusivamente de ventilação natural. Sendo assim, seria possível comparar os desempenhos de ambos os sistemas.

A ventilação da cozinha, na presença de exaustão mecânica, era realizada com dois níveis com a seguinte programação: 12h-14h e 18h30m-21h30m com $\approx 120\ m^3/h$ e no tempo restante $\approx 60\ m^3/h$ (caudal médio de 72,5 m^3/h, 3 *RPH* na cozinha). Pode admitir-se que, em termos médios, teríamos, aproximadamente, um caudal extraído de $50_{esq.} + 72{,}5_{fogão} + 10_{wc} = 132{,}5\ m^3/h$ (0,80 *RPH*). O estabelecimento dos caudais da cozinha teve por objectivo dotar as habitações com uma renovação horária média entre 0,6 a 0,8 h^{-1}, optando-se pelo valor superior por uma questão de incerteza em relação aos resultados a esperar. Sendo assim, a informação contida no Quadro 6.22 complementa a já apresentada no Quadro 6.3.

[3] Selou-se uma porta de um quarto dos apartamentos do tipo T3, apartamentos 6 e 7; estes apartamentos passaram a ter um volume de 169,3 m^3.

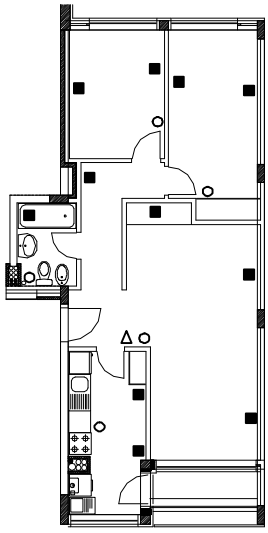
Quadro 6.22 - 1.ª campanha: determinação das renovações horárias. Características da exaustão da cozinha dos sistemas de ventilação implementados.

Apart.	Exaustão na cozinha (ϕ150)(1), (2)	Caudal médio "ponderado" [m^3/h]
1 (R/C)	Mecânica 32,6 - 110,7 m^3/h	48,9(3)
2 (3.º andar)	Mecânica: 59,6 - 122 m^3/h	72,6
3 (R/C)	Mecânica: 68,1 - 105 m^3/h	75,8
4 (1.º andar)	Natural	90,0(4)
5 (3.º andar)	Mecânica: 56,7 - 126,3 m^3/h	71,2
6 (R/C)	Mecânica: 62,4 - 141,9 m^3/h	79,0
7 (3.º andar)	Mecânica: 58,2 - 114,9 m^3/h	70,0
	Média(5)	70,0

Notas:
- 1: o vento induzia alguma turbulência na conduta. Sendo assim, os valores da exaustão devem ser considerados com alguma incerteza; exaustor mecânico situado na cobertura;
- 2: em face das dificuldades experimentais, os caudais apresentados tentam aproximar-se dos caudais nominais;
- 3: o exaustor mecânico instalado neste apartamento não funcionou nas melhores condições;
- 4: caudal nominal;
- 5: média excluindo o apartamento 4.

A determinação das renovações horárias decorreu entre os dias 2 e 9 de Agosto e as respectivas condições climáticas exteriores e interiores encontram-se no Anexo B.

Na determinação das renovações horárias usou-se a técnica passiva da emissão homogénea (PFT) já apresentada no §4. De seguida, apresenta-se a planta do apartamento tipo com a localização da instrumentação usada (Figura 6.29).



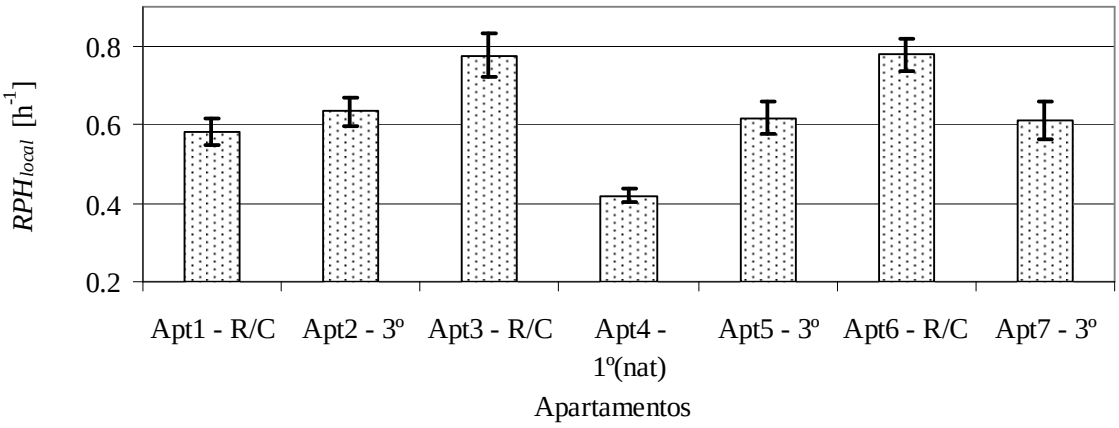
Legenda:

■ - cápsula emissora; ○ - cápsula receptora;

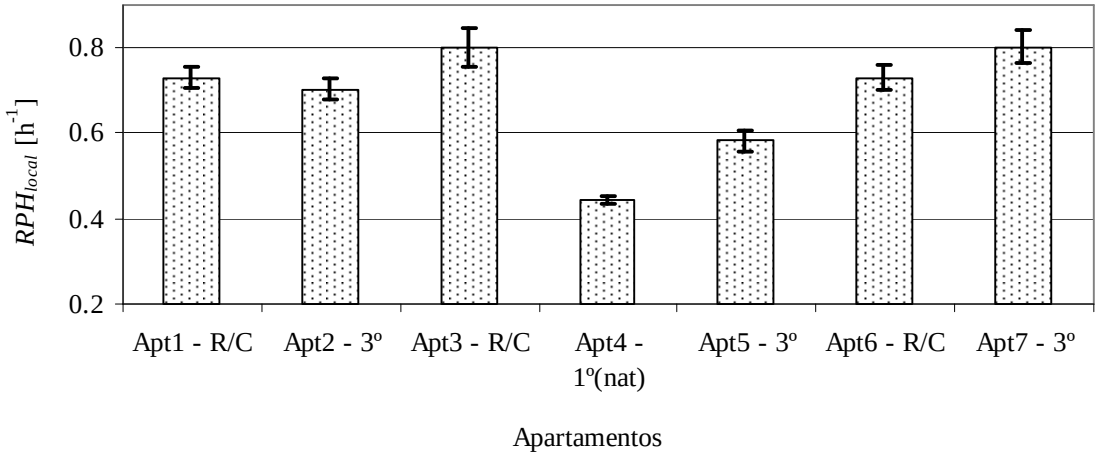
Δ - medição de *T* [ºC] e *HR* [%].

Figura 6.29 - 1.ª campanha: determinação das renovações horárias. Planta do apartamento tipo com indicação da posição do equipamento usado na técnica PFT.

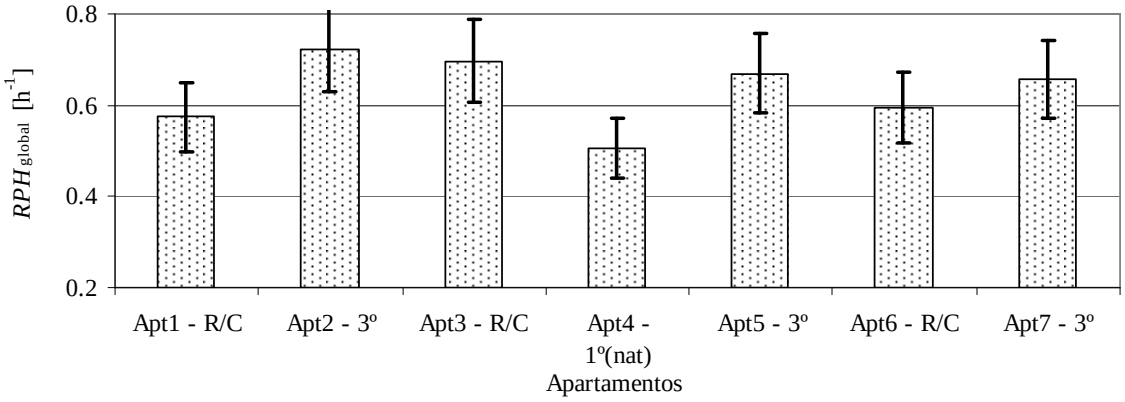
Apresentam-se na figura seguinte as médias das renovações horárias das instalações sanitárias, das cozinhas e dos apartamentos (obtidas com portas interiores abertas), com um período de medição de uma semana (incerteza local média de 7,6% e incerteza global de 13%).



a) RPH_{local}: instalações sanitárias.



b) RPH_{local}: cozinhas.



c) RPH_{global}.

Figura 6.30 - 1.ª campanha: determinação das renovações horárias. Técnica PFT.

Recordando o exposto no §4, localmente não se pode definir a taxa *RPH*, uma vez que esta taxa é obtida somente com ar exterior (novo). Por este motivo, não se podem comparar as renovações apresentadas nos gráficos anteriores (resultam de uma mistura ar "novo" + ar "velho") com as renovações advindas dos caudais nominais de ar novo para os compartimentos principais, 1 *RPH*, pela NP 1037-1: 2002, ou as renovações advindas dos caudais de extracção nos compartimentos de serviço, 4 *RPH*. Pode-se, contudo, fazer uma

análise relativa, comparando o desempenho de cada apartamento. Desta análise pode concluir-se que, por exemplo, no que diz respeito às instalações sanitárias, os apartamentos três e seis, situados no R/C, apresentam renovações horárias mais elevadas e as renovações horárias globais são mais elevadas para os apartamentos 2, 3 e 5, em que os dois últimos apartamentos estão mais expostos à acção do vento predominante (rumos SE e NW; ver Anexo B). Pode-se também concluir que o apartamento 4, que recorre exclusivamente à ventilação natural e que não possui ventilador estático nem grelha de desempenho melhorado na instalação sanitária, apresenta um desempenho inferior no que diz respeito às renovações horárias, locais ou globais.

Apresentam-se no Quadro 6.23 os caudais possíveis de calcular com os dados apresentados nas figuras anteriores.

Quadro 6.23 - 1.ª campanha: determinação das renovações horárias. Renovações horárias globais e caudais extraídos.

Apart.	RPH_{global} [h^{-1}]	q_{total} [m^3/h]	$q_{cozinha}$ [m^3/h]	q_{outros} (1) [m^3/h]
1 (R/C)	0,57	92,8	48,9	43,9
2 (3.º andar)	0,72	116,9	72,6	44,3
3 (R/C)(2)	0,70	112,5	75,8	36,8
4 (1.º andar)(2)	0,51	81,9		
5 (3.º andar)	0,67	108,2	71,2	37,0
6 (R/C)	0,59	100,6	79,0	21,6
7 (3.º andar)	0,66	111,0	70,0	41,0
Média(3)	0,65	107,0	70,0	37,4

Notas:
- 1: caudal inclui a extracção pela conduta do esquentador e instalação sanitária e eventual exfiltração pela permeabilidade da envolvente;
- 2: a direcção do vento nos rumos NW e SE, perpendiculares às fachadas, representou 35% das ocorrências;
- 3: média excluindo o apartamento 4.

Do quadro anterior pode concluir-se que os caudais, indirectamente medidos (q_{outros}), extraídos pelas condutas do esquentador e instalação sanitária são bastante reduzidos e que as renovações horárias globais são inferiores às esperadas (0,80 h^{-1}).

6.4.4. FLUXO NA INSTALAÇÃO SANITÁRIA DO APARTAMENTO 3

De modo a aquilatar-se o nível médio dos caudais extraídos na instalação sanitária mediram-se os mesmos no apartamento 3.

Na Figura 6.31 e Figura 6.32 apresentam-se as condições atmosféricas entre os dias 2 e 3 de Agosto (temperatura, velocidade e direcção do vento) bem como a temperatura e o caudal registados na instalação sanitária e conduta do apartamento 3. As condições de registo das variáveis foram as seguintes:

- temperatura exterior: registos espaçados de dez minutos;
- velocidade e direcção do vento: médias de dez minutos de registos espaçados de dez segundos;
- temperatura interior: médias de dez minutos de registos espaçados de um minuto;
- temperatura na conduta: registos espaçados de dez minutos;
- velocidade na conduta: médias de dez minutos de registos espaçados de dois segundos.

Pela observação da Figura 6.31, pode concluir-se que, neste caso, a velocidade do vento somente influencia os caudais extraídos na instalação sanitária quando o rumo do vento é aproximadamente perpendicular à fachada principal, isto é, no octante SE (≈6-15h), registando-se maiores caudais derivados de maiores velocidades do vento (4-6 m/s) entre as 7h e as 12h (caudal médio de 24,9 m^3/h, 2,7 *RPH*). Fora deste período poderá haver inversão do fluxo, como se pode observar na Figura 6.32, particularmente pelos picos de temperatura no interior da conduta entre as 12 e as 16h.

A existência apenas de picos de temperatura no interior da conduta (12-16h) e não de um valor médio da temperatura próxima da exterior evidencia que as rajadas de vento, gerando uma depressão no ventilador estático, se opõem ao efeito térmico da inversão de tiragem [6.25].

De acordo com a norma portuguesa para ventilação natural NP1037-1: 2002 [6.1], o caudal médio a extrair nas instalações sanitárias terá que ser de 45 m^3/h, valor que nunca foi

atingido (Figura 6.31). No período em análise obteve-se um caudal médio de 13,6 m^3/h, 1,5 *RPH* (valor aproximado do inicialmente admitido), e no período de maior calmia (20-6h), obteve-se um caudal médio de 9,2 m^3/h, 1 *RPH*.

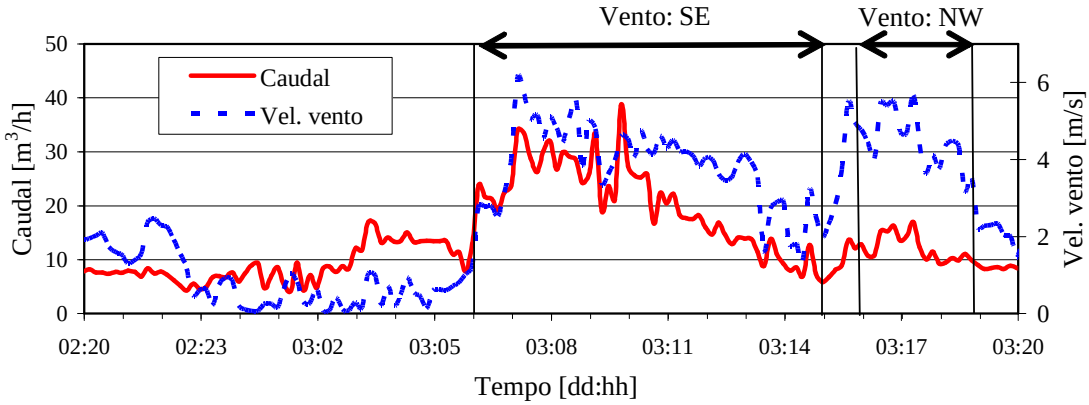


Figura 6.31 - 1.ª campanha: fluxo na instalação sanitária do apartamento 3. Caudal, velocidade e direcção do vento.

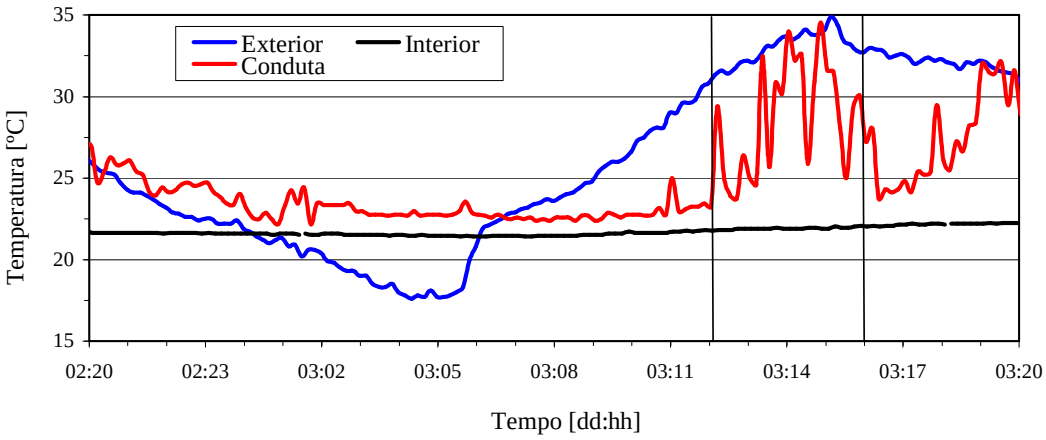


Figura 6.32 - 1.ª campanha: fluxo na instalação sanitária do apartamento 3. Temperatura interior, na conduta e no exterior.

6.4.5. SÍNTESE CRÍTICA DA PRIMEIRA CAMPANHA EXPERIMENTAL

Da 1.ª campanha, podem-se retirar as seguintes conclusões principais [6.8], [6.29]:

- o ventilador estático e a utilização de grelhas com baixa perda de carga na extracção da instalação sanitária ($\Delta p_{\text{total-45m3/h}} = 2$ Pa) são preponderantes para se obterem acréscimos significativos nas renovações horárias na instalação sanitária relativamente ao apartamento 4 que não recorre a estes dispositivos (a diferença entre a renovação horária média das instalações sanitárias com conduta modificada em relação à do apartamento 4 foi de 60%);
- o uso de condutas de ϕ125 de diâmetro nas instalações sanitárias nos apartamentos 6 e 7 não incrementou os caudais extraídos, relativamente à conduta de ϕ110;
- apesar da exaustão mecânica recorrer a caudais reduzidos na cozinha (≈ 60 m^3/h durante 19h do dia), os caudais por via da ventilação natural (apartamento 4) são ainda inferiores;
- a acção do vento, incrementando as renovações horárias, faz-se sentir essencialmente nos apartamentos sob a cobertura e nos apartamentos expostos aos rumos predominantes, ou seja, perpendiculares aos apartamentos 3 a 5 (octantes NW e SE);
- os casos de baixa renovação horária surgem, essencialmente, no piso do R/C, menor exposição à acção do vento, e no caso do apartamento com sistema de ventilação exclusivamente natural (apartamento 4);
- a renovação horária global dos apartamentos com um sistema misto de ventilação regista valores razoáveis, embora inferiores aos inicialmente previstos, com uma variação entre 0,57 a 0,72 *RPH*. Estas taxas variam ligeiramente com a localização em termos de altura e orientação dos apartamentos, registando o apartamento ventilado naturalmente (apartamento 4) um valor de 0,51 h^{-1}.

6.5. SEGUNDA CAMPANHA EXPERIMENTAL: INVERNO DE 2006 - APARTAMENTOS DESOCUPADOS

6.5.1. OBJECTIVO

A segunda campanha decorreu entre Dezembro de 2005 e Março de 2006 e pretendia caracterizar o desempenho do sistema de ventilação misto em condições climáticas características de tempo de Inverno. Sendo assim, desenvolveram-se ensaios tendo como objectivo determinar as renovações horárias locais e globais, obtidas com portas abertas, recorrendo ao método dos gases traçadores, mais concretamente às técnicas PFT e do declive. Durante a realização dos ensaios anteriores também se determinaram os caudais extraídos nas condutas da instalação sanitária e fogão.

Os caudais extraídos na cozinha nesta campanha constam do Quadro 6.24.

Quadro 6.24 - 2.ª campanha: características da exaustão da cozinha dos sistemas de ventilação implementados.

Apart.	Exaustão na cozinha (ϕ150)(1), (2)	Caudal médio "ponderado" [m^3/h]
1 (R/C)	Mecânica: 86,0 - 106,6 m^3/h	90,3
2 (3.º andar)	Mecânica: 87,7 - 125,6 m^3/h	95,6
3 (R/C)	Mecânica: 96,3 - 113,5 m^3/h	99,9
4 (1.º andar)	Natural	90(3)
5 (3.º andar)	Mecânica: 96,3 - 113,5 m^3/h	99,9
6 (R/C)	Mecânica: 87,7 - 106,6 m^3/h	91,7
7 (3.º andar)	Mecânica: 87,7 - 110,1 m^3/h	92,4
	Média	95,0(4)

Notas:
- 1: o vento induzia alguma turbulência na conduta. Sendo assim, os valores da exaustão devem ser considerados com alguma incerteza; exaustor mecânico situado na cobertura;
- 2: em face das dificuldades experimentais, os caudais apresentados tentam aproximar-se dos caudais nominais;
- 3: caudal nominal;
- 4: média excluindo o apartamento 4.

O estabelecimento dos caudais anteriores teve por objectivo dotar as habitações com uma renovação horária média superior à alcançada na primeira campanha (0,65 h^{-1}), sem contudo ser excessiva, de modo a não provocar um aumento significativo no consumo de

energia para aquecimento ambiente e de modo a evitar a redução do caudal extraído na conduta da instalação sanitária ou eventuais inversões de fluxo na mesma conduta.

Em face da instalação de duas condutas em paralelo na instalação sanitária em seis apartamentos (adiante designadas por condutas normal e modificada), também se realizaram ensaios tendo como objectivo determinar a influência do isolamento térmico, do aquecimento ambiente, da grelha fixa de extracção e do ventilador estático da conduta da instalação sanitária nos caudais extraídos (em condições de ventilação natural). Estes são apresentados no ponto seguinte.

6.5.2. INFLUÊNCIA DA CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO DA INSTALAÇÃO SANITÁRIA NO CAUDAL EXTRAÍDO - ESTUDO DE SENSIBILIDADE

6.5.2.1. Objectivo

Como já referido no §6.1.2, no âmbito da caracterização do sistema instalado, inseriu-se uma conduta suplementar de PVC, adiante designada por “modificada”, na instalação sanitária de todos os apartamentos ensaiados, à excepção do apartamento 4, de diâmetro igual à “normal”, isolada pelo exterior com poliuretano com uma espessura aproximada de 3 cm; conjuntamente, instalou-se também uma grelha com baixa perda de carga e um ventilador estático na saída da conduta na cobertura (já caracterizados nos pontos anteriores).

A conduta adiante designada por “normal” (não modificada) tem uma vulgar grelha de extracção e não tem isolamento térmico e ventilador estático.

Os ensaios apresentados seguidamente tiveram como objectivo avaliar o impacte dos dispositivos instalados, bem como o isolamento térmico e aquecimento ambiente, nos caudais extraídos (registo simultâneo nas duas condutas), em condições de ventilação natural na cozinha e portas interiores abertas [6.8], [6.29].

Os ensaios decorreram no apartamento 3 (desocupado) entre os meses de Dezembro de 2005 e Março de 2006 e tiveram uma duração média de 33 horas. No Quadro 6.25 apresentam-se resumidamente os ensaios levados a efeito nesta campanha experimental.

Quadro 6.25 - Estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Resumo dos ensaios efectuados.

Ensaio	Configuração do sistema	Configuração		
			Cond. normal	Cond. modificada
Situação corrente	- Cond. modificada: sem alterações; - Cond. normal: sem alterações.	A		
Influência do ventilador estático e do aquecimento ambiente	- Cond. modificada: sem grelha de extracção; - Cond. normal: sem grelha de extracção; - Dois em três ensaios, com aquecimento ambiente.	B		
		C	+ ΔT	
Influência da grelha de extracção	- Cond. modificada: sem ventilador estático; - Cond. normal: sem alterações.	D		
	- Cond. modificada: sem ventilador estático; - Cond. normal: sem grelha de extracção.	E		
Influência do aquecimento ambiente e do isolamento térmico da conduta	- Cond. modificada: sem alterações; - Cond. normal: sem alterações; - Três ensaios com aquecimento ambiente.	F		
			+ ΔT	

Notas:

ΔT - ensaio com diferença de temperatura interior-exterior obtida através de radiadores;

- conduta não isolada, sem grelha e sem ventilador estático;

- conduta isolada, sem grelha e sem ventilador estático;

- ventilador estático;

- grelha com baixa perda de carga;

- grelha "corrente" (*standard*).

As condições de registo das variáveis foram as seguintes:

- temperatura exterior: registos espaçados de dez minutos;
- velocidade e direcção do vento: médias de dez minutos de registos espaçados de seis segundos;
- temperatura interior: médias de dez minutos de registos espaçados de um minuto;

- velocidade nas condutas (medida no 3.º andar): médias de dez minutos de registos espaçados de seis segundos;
- temperatura no interior das condutas (medida no 3.º andar): médias de dez minutos de registos espaçados de quinze segundos.

6.5.2.2. Situação corrente

De modo a comparar-se o desempenho relativo sem alterações nas duas condutas, procedeu-se à realização de dois ensaios constantes do Quadro 6.26.

Quadro 6.26 - 2.ª campanha: estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Resultados da situação corrente.

Características	Descrição	
Data do ensaio:	15 - 16/12/2005	14 - 16/3/2006
Configuração do ensaio:	A	A
Vento - velocidade média:	2,4 m/s(1)	0,8 m/s(1)
Vento - direcção predominante:	NE + E + SE = 83%	SE + S = 39%
$\Delta T_{int\text{-}ext}$:	13,2 - 9,5 = 3,7ºC	16,9 – 12,0 = 4,8ºC
Caudal médio na conduta modificada:	17,3 m^3/h	9,0 m^3/h
Caudal médio na conduta normal:	8,0 m^3/h	7,3 m^3/h

Nota:
- 1: segundo as normais para a Serra do Pilar, Figura 6.16, a velocidade média registada situa-se bastante abaixo dos valores médios por rumo para a situação de Inverno (4 - 6 m/s).

A título exemplificativo, apresenta-se na Figura 6.33 a evolução dos caudais extraídos, bem como a velocidade e direcção do vento para o ensaio realizado entre os dias 15 e 16 de Dezembro.

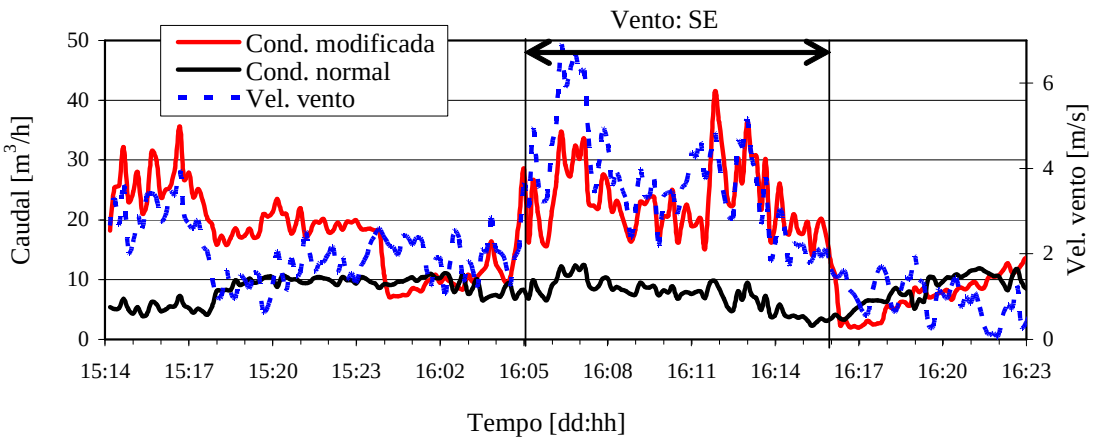


Figura 6.33 - 2.ª campanha: estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Situação corrente. Caudais, velocidade e direcção do vento.

Dos resultados apresentados, pode-se concluir que os dispositivos implementados na conduta modificada, grelha de baixa perda de carga e ventilador estático, incrementam o caudal relativamente à conduta normal, sendo este incremento bastante dependente da direcção (maior preponderância em direcções perpendiculares às fachadas: SE e NW) e velocidade do vento. Os picos da velocidade do vento conduzem a maiores incrementos nos caudais da conduta modificada (com ventilador estático). No entanto, o caudal médio extraído (17,3 m^3/h) é, mesmo assim, bastante baixo.

6.5.2.3. Influência do ventilador estático e do aquecimento ambiente

De modo a avaliar-se a importância do ventilador estático, retiraram-se as grelhas de extracção e simultaneamente realizou-se aquecimento ambiente (recurso a radiadores com 1200 W; 26 a 27 de Dezembro e 2 a 4 de Janeiro). Sendo assim, procedeu-se à realização dos ensaios constantes do Quadro 6.27.

Como referido em §6.3.1.5, a saída das condutas de extracção das instalações sanitárias encontra-se em zona de depressão, assim, o potencial efeito de depressão do ventilador estático não é aproveitado.

Quadro 6.27 - 2.ª campanha: estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Resultados dos ensaios sem grelhas de extracção.

Características	Descrição		
Data do ensaio:	23 a 24/12/2005	26 a 27/12/2005	2 a 4/1/2006
Configuração do ensaio:	B	B	C
Vento - velocidade média:	0,8 m/s	2,5 m/s	1,2 m/s
Vento - direcção predominante:	SE + S = 66%	W + NW = 61%	NW + N = 50%
$\Delta T_{int\text{-}ext}$:	14,7 – 10,1 = 4,6ºC	20,5 – 12,4 = 8,1ºC	19,1 – 9,2 = 10,6ºC
Caudal médio na conduta modificada:	22,4 m^3/h	13,8 m^3/h	16,0 m^3/h
Caudal médio na conduta normal:	22,4 m^3/h	28,7 m^3/h	30,1 m^3/h

Apresenta-se na Figura 6.36 a evolução dos caudais extraídos bem como a velocidade e direcção do vento, para o ensaio entre os dias 23 e 24 de Dezembro.

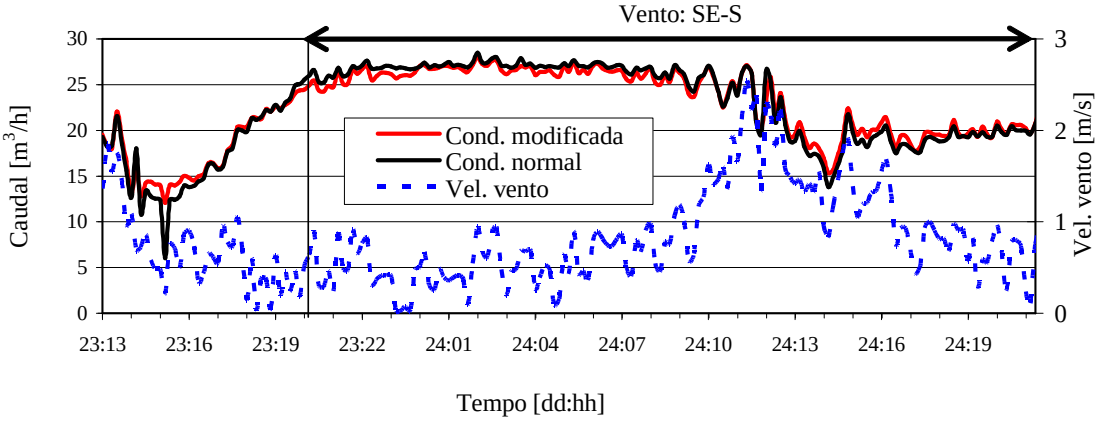


Figura 6.34 - 2.ª campanha: estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Situação sem grelhas de extracção. Caudais, velocidade e direcção do vento.

Apresenta-se na Figura 6.35 a mesma situação, mas com aquecimento ambiente entre os dias 2 e 4 de Janeiro.

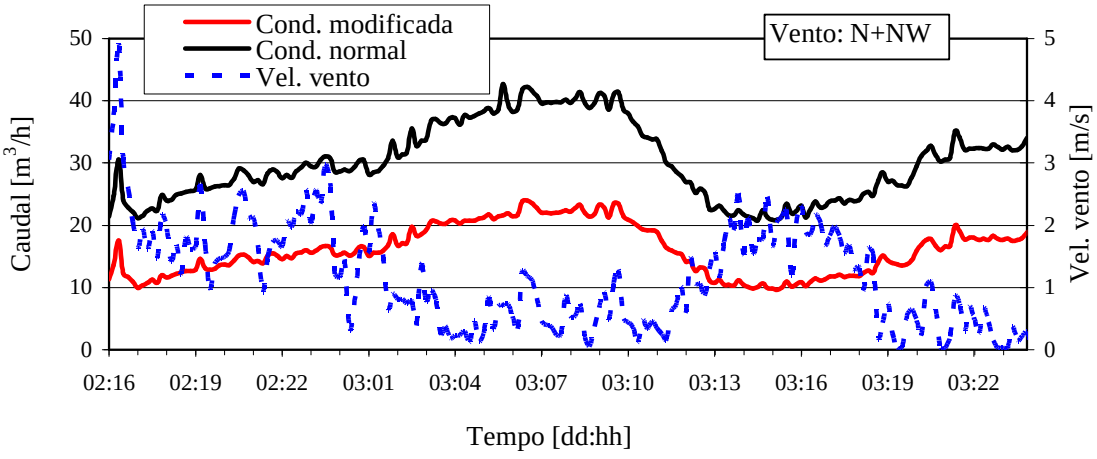


Figura 6.35 - 2.ª campanha: estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Situação sem grelhas de extracção e com aquecimento ambiente. Caudais, velocidade e direcção do vento.

Da análise da Figura 6.34, pode-se concluir que em situação de vento fraco o ventilador estático somente produz efeitos para compensar a influência negativa da perda de carga deste. Sendo assim, anormalmente, os dois caudais apresentam o mesmo andamento e o mesmo valor médio (22,4 m^3/h). Mais uma vez se observa que a direcção do vento é preponderante para se obter um incremento dos caudais, apesar de, por vezes, a velocidade ser baixa. Observa-se também que a ausência de grelhas possibilitou, com velocidades do vento muito baixas, caudais bastante razoáveis (máximo de 28 m^3/h), comparativamente aos restantes ensaios.

Com aquecimento ambiente na conduta modificada, Figura 6.35, a influência da perda de carga do ventilador sobrepõe-se à influência do isolamento térmico, fazendo com que a conduta não isolada, com menor perda de carga, obtenha caudais superiores, registando-se uma diferença média, para o ensaio de 2 a 4 de Janeiro, nos caudais extraídos de aproximadamente 14,0 m^3/h ($\Delta T_{int\text{-}ext}$ = 10,6ºC).

6.5.2.4. Influência da grelha de extracção

De modo a avaliar-se a importância da grelha fixa de extracção, retirou-se o ventilador estático da conduta modificada (27 a 29 de Dezembro: ensaio comparativo das duas

grelhas) e retirou-se a grelha da conduta não modificada (23 a 24 de Dezembro: ensaio sem perdas de carga localizada na conduta normal). Sendo assim, procedeu-se à realização dos ensaios constantes do Quadro 6.28.

Quadro 6.28 - 2.ª campanha: estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Resultados dos ensaios relativos à influência das grelhas.

Características	Descrição	
Data do ensaio:	27 a 29/12/2005	23 a 24/2/2006
Configuração do ensaio:	D	E
Vento - velocidade média:	2,1 m/s	1,0 m/s
Vento - direcção predominante:	W + NW + N = 65%	Variável
$\Delta T_{int\text{-}ext}$:	15,4 – 10,6 = 4,8ºC	11,9 – 7,0 = 4,9ºC
Caudal médio na conduta modificada:	10,0 m^3/h	7,8 m^3/h
Caudal médio na conduta normal:	8,3 m^3/h	16,3 m^3/h

Apresenta-se na Figura 6.36 a evolução dos caudais extraídos bem como a velocidade e direcção do vento para o ensaio entre os dias 27 e 29 de Dezembro (sem ventilador estático).

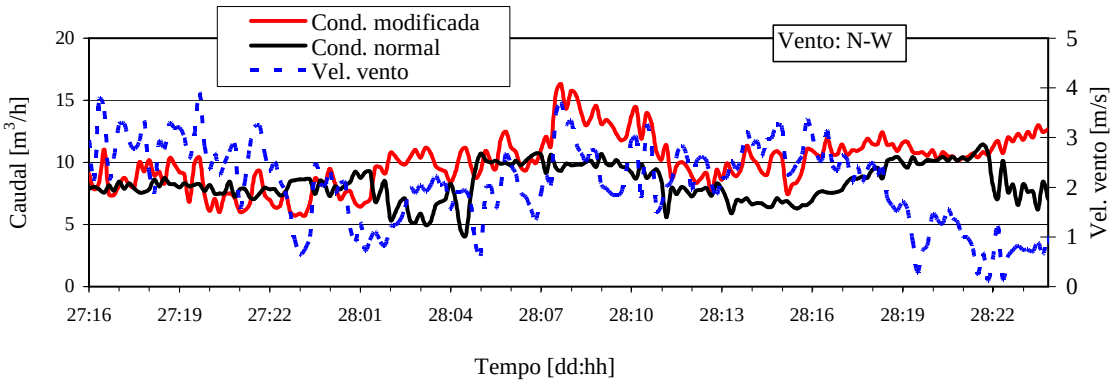


Figura 6.36 - 2.ª campanha: estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Situação sem ventilador estático. Caudais, velocidade e direcção do vento.

Apresenta-se na Figura 6.37 a evolução dos caudais extraídos bem como a velocidade e direcção do vento para o ensaio entre os dias 23 e 24 de Fevereiro (ensaio sem grelha na conduta normal).

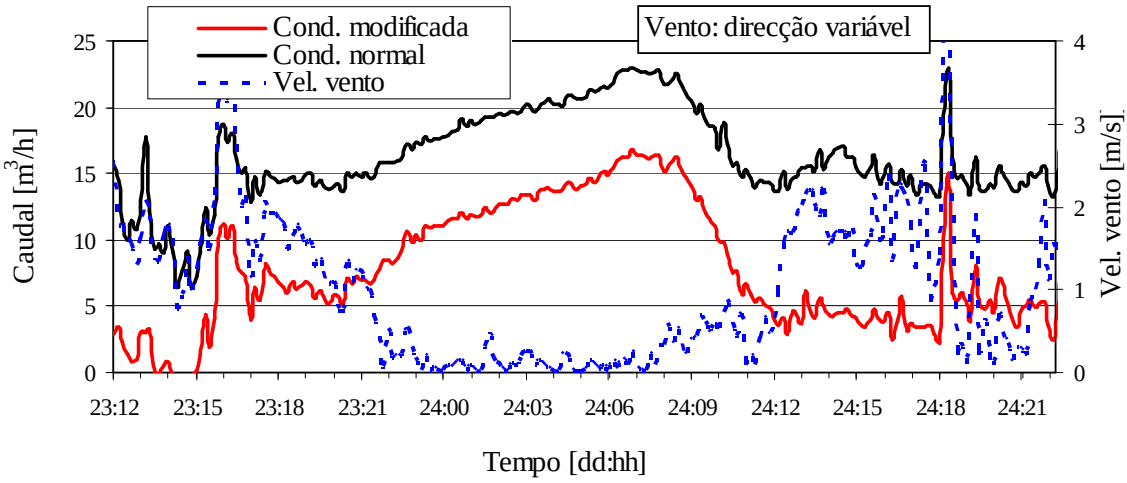


Figura 6.37 - 2.ª campanha: estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Situação sem grelha na conduta normal. Caudais, velocidade e direcção do vento.

Dos resultados apresentados, pode-se concluir que a grelha com perda de carga elevada restringe consideravelmente o caudal na respectiva conduta.

Comparando o ensaio de 15 e 16 de Dezembro, situação corrente - com ventilador estático (§6.5.2.2), com o presente ensaio de 27 a 29 de Dezembro, conclui-se que, para velocidades médias da mesma ordem de grandeza, 2,1 a 2,4 m/s, os caudais médios são mais elevados na presença do ventilador estático (17,3 m^3/h no 1.º ensaio e 10,0 m^3/h no 2.º ensaio).

6.5.2.5. Influência do aquecimento ambiente e do isolamento térmico na conduta

De modo a compararmos o desempenho relativo entre as duas condutas na situação de aquecimento ambiente, procedeu-se à realização de três ensaios constantes do Quadro 6.29.

Quadro 6.29 - 2.ª campanha: estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Resultados na situação de aquecimento ambiente.

Características	Descrição		
Data do ensaio:	20 - 21/12/2005	7 - 9/3/2006	10 - 11/3/2006
Configuração do ensaio:	F	F	F
Vento - velocidade média:	3,3 m/s	1,0 m/s	2,3 m/s
Vento - direcção predominante:	E + SE = 81%	Variável	N + NW = 66%
$\Delta T_{int\text{-}ext}$:	17,8–10,9 = 6,9ºC	23,9–12,3 = 11,6ºC	24,0–12,8 = 11,2ºC
Caudal médio na conduta modificada:	19,8 m^3/h	15,5 m^3/h	16,3 m^3/h
Caudal médio na conduta normal:	10,0 m^3/h	15,8 m^3/h	13,2 m^3/h

Apresenta-se na Figura 6.38 a evolução dos caudais entre os dias 20 e 21 de Dezembro e na Figura 6.39 a evolução das temperaturas exterior, na instalação sanitária e no interior das condutas entre os dias 10 e 11 de Março (temperatura nas condutas medidas no 3.º andar).

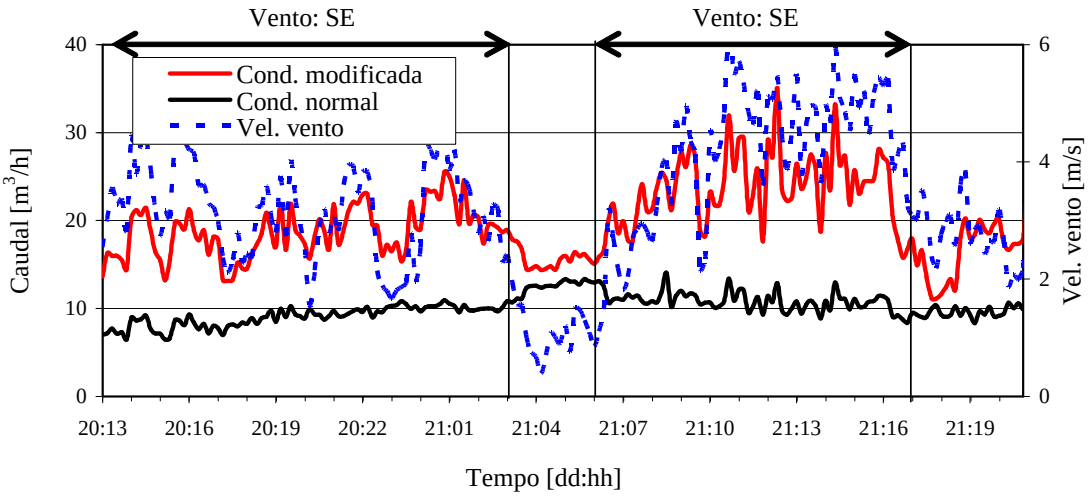


Figura 6.38 - 2.ª campanha: estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Situação com aquecimento ambiente. Caudais, velocidade e direcção do vento.

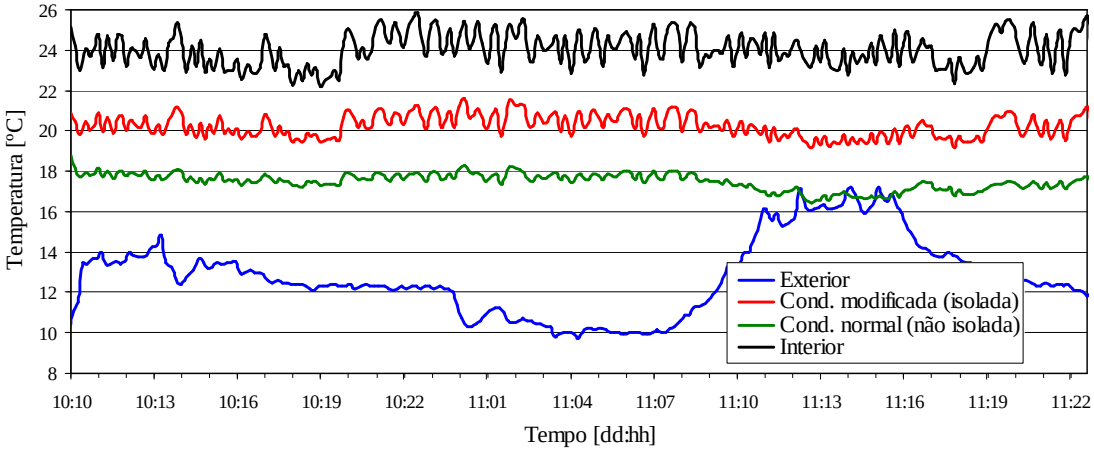


Figura 6.39 - 2.ª campanha: estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Situação com aquecimento ambiente. Temperaturas: exterior, na instalação sanitária e no interior das condutas.

De modo a comparamos a situação anterior com a situação sem aquecimento ambiente, apresenta-se na figura seguinte a evolução das temperaturas para o caso do ensaio decorrido entre os dias 14 e 16 de Março, já apresentado no §6.5.2.2. Neste caso, não existe uma diferenciação clara entre a temperatura das condutas e entre estas e a do interior, possivelmente, devido à incerteza da calibração instrumental.

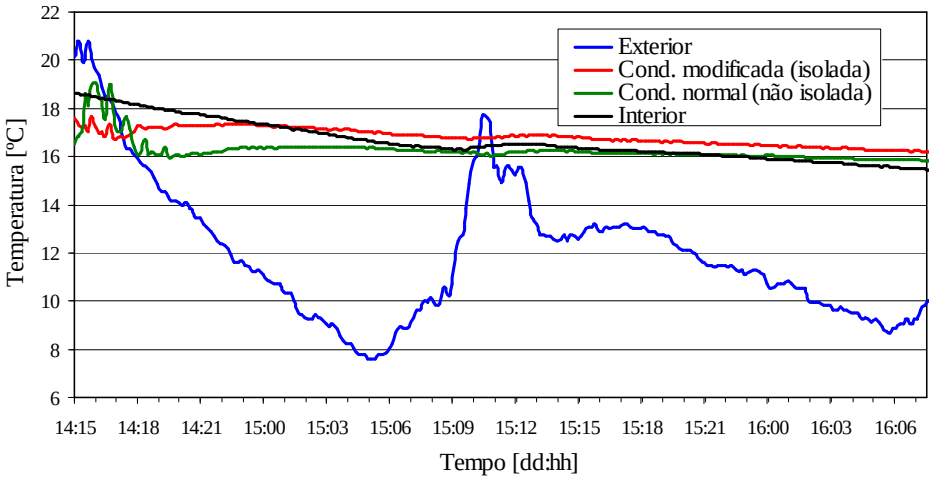


Figura 6.40 - 2.ª campanha: estudo de sensibilidade no sistema de ventilação da instalação sanitária. Situação sem aquecimento ambiente. Temperaturas: exterior, na instalação sanitária e no interior das condutas.

Dos resultados apresentados, pode-se concluir que, à semelhança do ensaio de 15 e 16 de Dezembro, os dispositivos implementados na conduta modificada, grelha de baixa perda de carga e ventilador estático, incrementam o caudal relativamente à conduta normal, sendo este incremento bastante dependente da direcção (maior preponderância em direcções perpendiculares às fachadas) e velocidade do vento (ver Figura 6.38).

O caudal médio extraído (máximo de 19,8 m^3/h) continua a ser bastante baixo e mais dependente do vento do que do diferencial de temperatura (os ensaios com maior velocidade média do vento, 1.º e 3.º, sobrepõem-se ao 2.º ensaio com vento mais fraco mas diferencial de temperatura maior).

Em relação ao efeito do isolamento térmico, este pode ser observado na Figura 6.39 donde se retira que a temperatura na conduta isolada é sempre superior em relação à conduta não aquecida (ΔT médio entre condutas = 2,8ºC). Na situação de não aquecimento (Figura 6.40), o isolamento térmico da conduta modificada não altera significativamente a temperatura no interior da conduta (ΔT médio entre condutas = 0,6ºC).

6.5.2.6. Síntese crítica

Quanto à influência do vento, pode-se concluir o seguinte:

- a velocidade e direcção do vento são preponderantes para se obterem incrementos significativos nos caudais extraídos, principalmente nos rumos perpendiculares às fachadas em estudo, SE e NW, mesmo em situações de velocidades do vento baixas;
- a velocidade do vento tem mais preponderância que o diferencial de temperatura no incremento dos caudais.

Quanto à influência do isolamento térmico da conduta e aquecimento ambiente, pode-se concluir o seguinte:

- o isolamento térmico faz-se sentir só na situação de aquecimento ambiente, provavelmente, porque, neste caso, a diferença de temperatura é maior, o que conduz a perdas térmicas mais significativas na conduta não isolada;

- o aquecimento ambiente só se revelou determinante para o incremento dos caudais na ausência de grelha fixa de extracção.

Quanto à influência da perda de carga das grelhas e do ventilador estático, pode-se concluir o seguinte:

- a situação de grelha com baixa perda de carga e ventilador estático revelou-se a mais favorável para se obterem caudais mais elevados;
- a grelha com elevada perda de carga restringe fortemente os respectivos caudais;
- na situação de velocidade do vento reduzida, a influência do ventilador estático é diminuta;
- os picos da velocidade do vento fazem-se sentir nos caudais, com maior relevância, na presença do ventilador estático.

No que diz respeito aos caudais e renovações horárias obtidos, pode-se concluir o seguinte:

- o maior caudal médio obtido na conduta modificada foi de 22,4 m^3/h, 2,4 *RPH*, atingido na ausência de grelha fixa extracção, vento fraco e perpendicular às fachadas (23 a 24 de Dezembro);
- o maior caudal médio obtido na conduta normal foi de 30,1 m^3/h, 3,3 *RPH*, atingido na ausência de grelha fixa extracção, vento fraco e perpendicular às fachadas e com aquecimento (2 a 4 de Janeiro);
- as situações com aquecimento ambiente (20 a 21 de Dezembro, 7 a 9 de Março e 10 a 11 de Março) revelaram um caudal médio máximo de 19,8 m^3/h, 2,1 *RPH*, na conduta modificada, atingido nas condições de sem grelha, vento fraco e perpendicular às fachadas;
- as situações correntes, sem alterações nas condutas (15 e 16 de Dezembro e 14 a 16 de Março), revelaram um caudal médio máximo de 17,3 m^3/h, 2,1 *RPH*, na conduta modificada, atingido nas condições de vento fraco e perpendicular às fachadas.

É de referir que, devido à variabilidade da velocidade do vento (brisas marítimas e terrestres com frequências de 12 h), a velocidade do vento, neste caso, ajusta-se à

utilização das instalações sanitárias: maior uso durante o dia (velocidade mais alta) e menor uso durante a noite (velocidade mais baixa) [6.25].

Como conclusão geral, pode retirar-se que em situação de ventilação natural na cozinha e de não utilização (sem aquecimento das águas sanitárias ou sem aquecimento ambiente), os caudais médios atingidos na conduta modificada são razoáveis, aproximadamente 2 *RPH*. Crê-se que, na situação de velocidade do vento com valores médios próximos dos das normais do local (4-6 m/s), os valores atingidos seriam razoavelmente superiores. No entanto, a direcção do vento seria sempre preponderante. É de realçar que, dificilmente o valor nominal de cálculo (45 m^3/h) seria atingido. De acordo com os resultados obtidos, o principal obstáculo na prossecução de caudais razoáveis é a grelha fixa de extracção.

6.5.3. RENOVAÇÕES HORÁRIAS

6.5.3.1. Objectivo

Pretendia-se nesta segunda campanha calcular as renovações horárias recorrendo à técnica PFT e do declive, já descritas no §4, e ensaiar os apartamentos nas mesmas condições da primeira campanha (à excepção da semana 4 a seguir descrita). Estes ensaios decorreram entre os meses de Janeiro e Fevereiro de 2006. Apresenta-se no Quadro 6.30 o respectivo planeamento.

Quadro 6.30 - 2.ª campanha: determinação das renovações horárias. Planeamento geral dos ensaios.

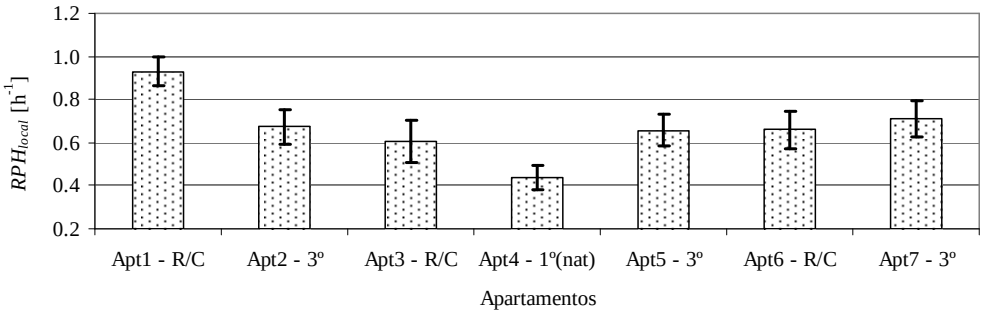
Apart.	Semana 1: 5-12 Jan.	Semana 2: 12-19 Jan.	Semana 3: 19-26 Jan.	Semana 4(1): 26-2 Fev.	Semana 5: 2-9 Fev.	Semana 6: 9-16 Fev.	Semana 7: 16-23 Fev.
1	PFT(2)	PFT		PFT			
2		PFT(2)		PFT			
3		PFT	PFT+dec(2),(3)	PFT			
4		PFT		PFT+dec(2)			
5		PFT		PFT	PFT+dec(2)		
6		PFT		PFT		PFT+dec(2)	
7		PFT		PFT			PFT+dec(2)

Notas:
- 1: ensaio realizado com a conduta "normal" da instalação sanitária;
- 2: apartamento aquecido com radiadores, colocados nos quartos (400 W), sala (800 W) e cozinha (800 W); os respectivos compartimentos continham termóstatos no pavimento regulados para 21,5ºC;
- 3: dec - técnica do declive.

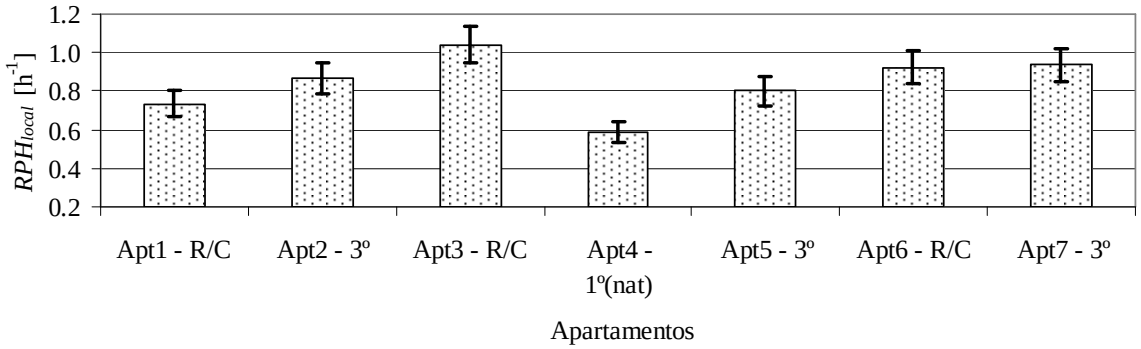
6.5.3.2. Técnica PFT

Por uma questão de síntese dos resultados somente se apresentarão em pormenor os resultados da semana 2 (12 a 19 de Janeiro), bem como a totalidade de todos os resultados das renovações horárias globais. As respectivas condições climáticas exteriores e interiores encontram-se no Anexo B.

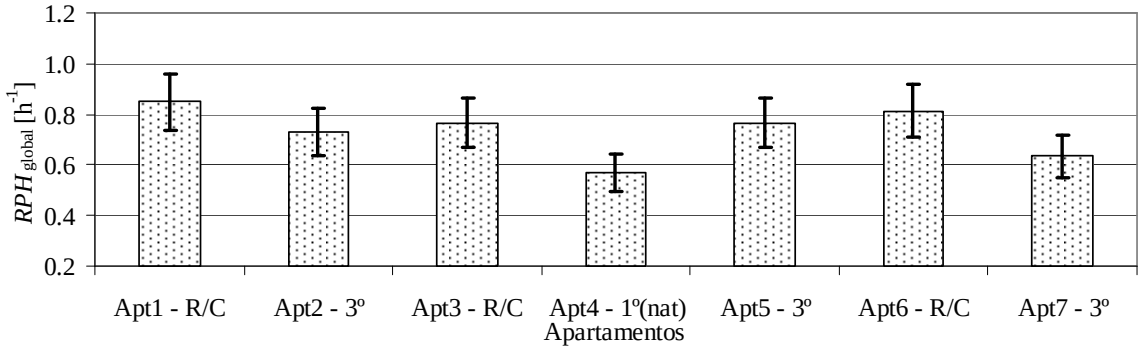
Apresentam-se na figura seguinte as médias das renovações horárias da instalação sanitária, da cozinha e dos apartamentos obtidas com a técnica PFT, com um período de medição de uma semana (incerteza local média de 9,2% e incerteza global de 13%). Este ensaio foi realizado com os apartamentos nas mesmas condições da primeira campanha experimental.



a) RPH_{local}: instalações sanitárias.



b) RPH_{local}: cozinhas.



c) RPH_{global}.

Figura 6.41 - 2.ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica PFT (semana 2).

Apresentam-se no Quadro 6.31 os caudais possíveis de calcular com as renovações horárias globais obtidas para a semana 2.

Quadro 6.31 - 2.ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica PFT (semana 2). Renovações horárias globais e caudais extraídos.

Apart.	RPH_{global} [h^{-1}]	q_{total} [m^3/h]	$q_{cozinha}$ [m^3/h]	q_{outros} (1) [m^3/h]
1 (R/C)	0,85	137,2	90,3	46,9
2 (3.º andar)	0,73	118,3	95,6	22,7
3 (R/C)	0,77	123,9	99,9	24,0
4 (1.º andar)(2)	0,57	92,4		
5 (3.º andar)	0,77	123,9	99,9	24,0
6 (R/C)	0,81	137,6	91,7	45,9
7 (3.º andar)	0,63	107,2	92,4	14,8
Média(3)	0,76	124,7	95,0	29,7

Notas:
- 1: caudal inclui a extracção pela conduta do esquentador e instalação sanitária e eventual exfiltração pela permeabilidade da envolvente;
- 2: a direcção do vento nos rumos SE+S, aproximadamente perpendicular às fachadas, representou 51% das ocorrências;
- 3: média excluindo o apartamento 4.

As conclusões mais notórias a retirar desta semana de ensaios são que, no que diz respeito às instalações sanitárias, o apartamento 1, situado no R/C, apresenta uma renovação horária mais elevada e as renovações horárias globais são bastante homogéneas à excepção dos apartamentos 4 e 7. Mais uma vez, o apartamento 4 apresenta um desempenho inferior no que diz respeito às renovações horárias, locais ou globais. Também se pode concluir que os caudais, indirectamente medidos (q_{outros}), extraídos pelas condutas do esquentador e instalação sanitária são reduzidos.

Renovações horárias da segunda campanha

Apresentam-se no Quadro 6.32 os resultados obtidos em todos os ensaios bem como as respectivas condições climáticas.

Quadro 6.32 - 2ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica PFT. Resultados da segunda campanha.

Ensaio n.º	Apart.	Data de início do ensaio	RPH_{global} [h^{-1}]	Vento		$\Delta T_{int-ext}$ [ºC]
				Vel. média [m/s]	Direcção	
1	1	05-01-2006	0,88	0,9	SE+S = 32%	8,2(1)
2	1	12-01-2006	0,85	1,4	SE+S = 51%	3,7
3	1	26-01-2006	0,96	1,7	SE+N = 36%	4,1
4	2	12-01-2006	0,73	1,4	SE+S = 51%	6,7(1)
5	2	26-01-2006	0,93	1,7	SE+N = 36%	3,2
6	3	12-01-2006	0,77	1,4	SE+S = 51%	2,8
7	3	19-01-2006	0,94	1,7	SE+S = 50%	7,5(1)
8	3	26-01-2006	0,95	1,7	SE+N = 36%	7,5
9	4(2)	12-01-2006	0,57	1,4	SE+S = 51%	2,4
10	4(2)	26-01-2006	0,69	1,7	SE+N = 36%	10,9(1)
11	5	12-01-2006	0,77	1,4	SE+S = 51%	1,7
12	5	26-01-2006	0,87	1,7	SE+N = 36%	4,6
13	5	02-02-2006	0,71	1,4	SE+S = 36%	7,9(1)
14	6	12-01-2006	0,81	1,4	SE+S = 515	2,1
15	6	26-01-2006	0,79	1,7	SE+N = 36%	4,3
16	6	05-01-2006	0,65	1,3	SE+S = 31%	4,8(1)
17	7	12-01-2006	0,63	1,4	SE+S = 51%	0,9
18	7	26-01-2006	0,65	1,7	SE+N = 36%	3,3
19	7	16-02-2006	0,66	3,1	W+NW+N = 64%	7,8(1)
		Média	0,80(3)	1,6		5,0

Notas:
- 1: apartamento aquecido;
- 2: apartamento com sistema de ventilação natural;
- 3: média obtida excluindo o apartamento 4.

Da análise do quadro anterior, as conclusões mais notórias a retirar são as seguintes:

- a renovação horária média global para o sistema misto foi a desejada (0,80 h^{-1});
- embora a direcção do vento tenha tido um comportamento normal (direcções predominantes de SE e S), a velocidade média do vento situou-se bastante abaixo do previsível (4-6 m/s; ver Figura 6.16);
- não se observa um acréscimo notório nas renovações horárias devidas ao aquecimento ambiente dos apartamentos.

6.5.3.3. Técnica do declive

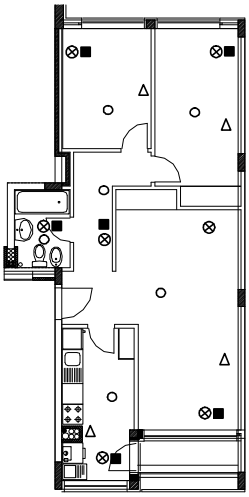
Também se realizaram, simultaneamente, alguns ensaios recorrendo à técnica do declive, já apresentada no §4.

A técnica do declive requer menor tempo de execução e, normalmente, menor preparação. No entanto, apresenta a desvantagem de calcular resultados pontuais. Em face da curta duração do ensaio, a renovação horária calculada é válida somente para uma dada situação climática. Variando esta, deverá repetir-se o ensaio. Sendo assim, procurou-se realizar, sempre que possível, vários ensaios no mesmo apartamento.

O equipamento usado foi o seguinte (semelhante ao usado em Gävle - Suécia):

- analisador de gás SF6, referência Innova 1312, recorrendo ao princípio da espectroscopia fotoacústica de radiação infravermelha;
- equipamento de dosagem e recolha de gás, referência Innova 1303, com capacidade de amostragem de seis pontos;
- 7 ventiladores com potência de 20 W (um em cada compartimento, à excepção da sala com dois).

As condições de realização dos ensaios foram semelhantes às dos ensaios de Gävle - Suécia (medição do decaimento no centro dos compartimentos e a meia altura do pé-direito; emissão do gás na parte posterior do ventilador). Na Figura 6.42 apresenta-se a planta do apartamento tipo com indicação da posição do equipamento usado nesta técnica.



Legenda:

■ - emissão; ○ - recolha;
⊗ - ventilador. Δ - radiador.

Figura 6.42 - 2.ª campanha: determinação das renovações horárias. Planta do apartamento tipo com indicação da posição do equipamento usado na técnica do declive.

A título demonstrativo, apresentam-se na Figura 6.43 os resultados obtidos no ensaio do apartamento 6 e particularmente a renovação horária local do quarto 2.

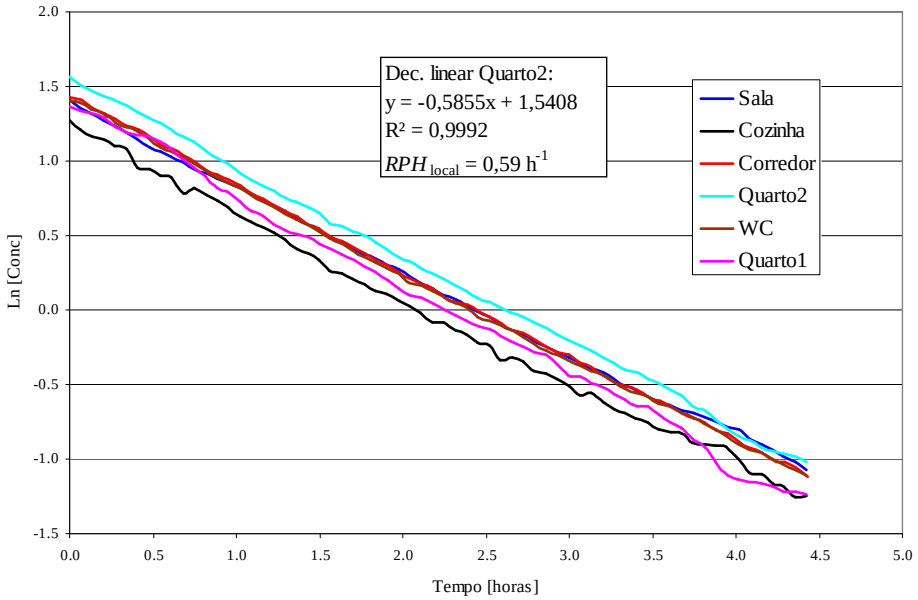


Figura 6.43 - 2.ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica do declive. Ensaio no apartamento 6.

No Quadro 6.33 apresentam-se todos os resultados obtidos com a técnica do declive e a sua comparação com os resultados da técnica PFT. Observa-se que as duas técnicas apresentam resultados médios bastante próximos (ambas as incertezas já foram apresentadas no §4).

Quadro 6.33 - 2ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica do declive. Comparação com a técnica PFT.

Apart.	Data e duração do ensaio pela técnica do declive	$RPH_{declive}$ [h^{-1}]	RPH_{PFT} [h^{-1}]	Vento(1)		$\Delta T_{int\text{-}ext}$ (1) [ºC]
				Vel. média [m/s]	Direcção	
3	25 Jan: 17h00 - 18h30	0,76	0,94	5,1	E+SE = 95%	6,8
3	25 Jan: 18h30 - 21h30	0,84	0,94	3,9	E+SE = 87%	7,1
4(2)	30 Jan: 14h35 - 15h45	0,62	0,69	1,5	N+NE = 52%	4,9
5	2 Fev: 12h00 - 14h00	1,27	0,71	2,9	SE+S = 87%	-3,8
5	2 Fev: 15h50 - 18h30	0,51	0,71	1,1	NW+W = 50%	0,2
5	6 Fev: 15h00 - 18h20	0,68	0,71	1.0	N+NW = 36%	4,0
5	8 Fev: 14h12 - 17h25	0,77	0,71	1,5	N+NW = 77%	3,4
5	8 Fev: 18h30 - 21h30	0,62	0,71	1.0	N+NE = 66%	9,4
6	9 Fev: 14h00 - 18h30	0,57	0,65	0,8	N+NE = 34%	-2,2
7	16 Fev: 14h19 - 18h20	0,86	0,66	3,9	W+NW = 77%	-1,1
7	21 Fev: 14h10 - 18h10	0,92	0,66	3,5	N = 70%	7,4
	Média	0,77	0,74	2,4		

Notas:
- 1: dados meteorológicos referentes ao ensaio com a técnica do declive;
- 2: apartamento com sistema de ventilação natural.

Na Figura 6.44 apresenta-se a correlação obtida entre as renovações horárias obtidas com a técnica do declive e a velocidade do vento (retirou-se o primeiro ensaio com velocidade média do vento de 5,1 m/s). Observa-se uma correlação positiva, embora não muito significativa, demonstrando a influência da velocidade do vento nos resultados obtidos por esta técnica.

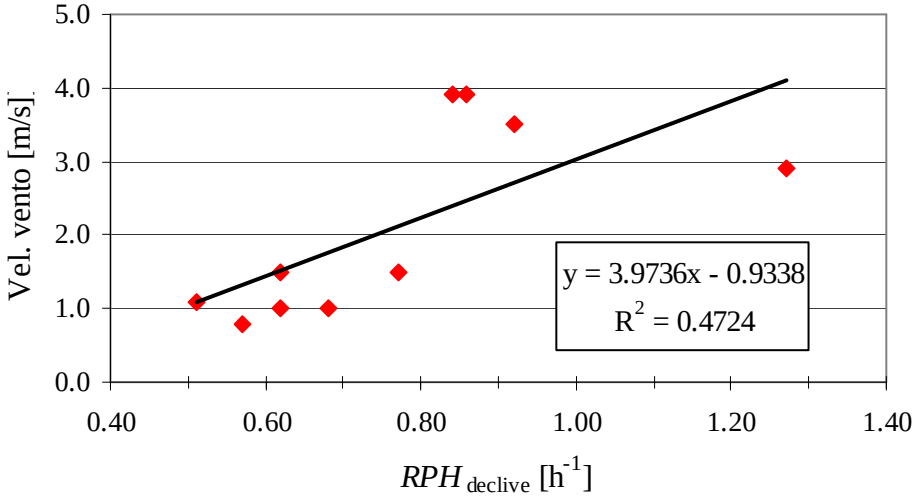


Figura 6.44 - 2.ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica do declive. Correlação com a velocidade do vento.

As principais conclusões a retirar dos ensaios realizados, recorrendo à técnica do declive, são as seguintes:

- as renovações horárias "pontuais" obtidas aproximam-se das obtidas pela técnica PFT;
- a velocidade do vento tem influência na renovação horária média "pontual".

6.5.3.4. Síntese crítica

A síntese das condições climáticas obtidas nas duas primeiras campanhas é apresentada no Quadro 6.34 (em relação à segunda campanha, somente se apresentam as semanas 2 e 4).

Quadro 6.34 - Condições climáticas durante as primeiras duas campanhas de medição pela técnica PFT.

Apart.	Orientação	2/8 a 9/8 de 2005[1]	12/1 a 19/1 de 2006[1]	26/1 a 2/2 de 2006[2]
		$T_{\text{média interior}}$ [ºC]		
1 (R/C)	NE/SW	24,0	12,5	10,0
2 (3.º andar)		26,0	15,5[3]	9,1
3 (R/C)	SE/NW	23,2	11,6	13,4
4 (1.º andar)		24,2	11,2	16,8[3]
5 (3.º andar)		-	10,5	10,5
6 (R/C)	SW/NE	23,6	10,9	10,2
7 (3.º andar)		25,7	9,7	9,2
Condições climáticas exteriores				
$T_{\text{média interior}}$ [ºC]		24,5	11,1[4]	10,4[4]
$T_{\text{média exterior}}$ [ºC]		25,4	8,8	5,9
Vento - velocidade média [m/s]		1,9	1,4	1,7
Vento - direcção predominante		SE+NW = 34%	S+SE = 51%	N+SE = 36%

Notas:
- 1: ensaio com conduta modificada na instalação sanitária: com isolamento (≈ 3 cm), grelha com baixa perda de carga e ventilador estático, à excepção do apartamento 4;
- 2: ensaio com conduta normal na instalação sanitária: não isolada, grelha "corrente" e sem ventilador estático;
- 3: apartamento aquecido com radiadores;
- 4: média obtida sem o apartamento aquecido.

Na Figura 6.45, Figura 6.46 e Figura 6.47 apresenta-se a análise comparativa, respectivamente, das renovações horárias locais das instalações sanitárias, cozinhas e das renovações horárias globais. Em relação à segunda campanha, apresentam-se as semanas 2 e 4, esta com conduta "normal" na instalação sanitária.

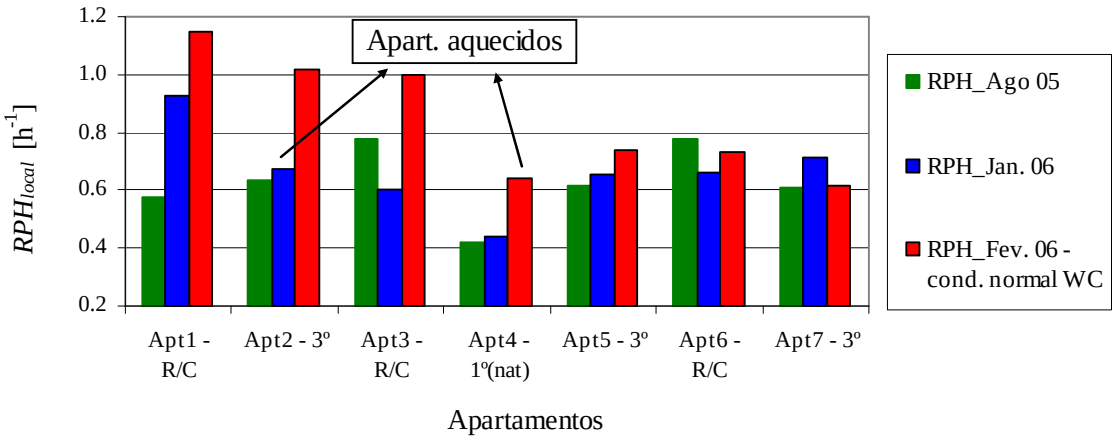


Figura 6.45 - Determinação das renovações horárias pela técnica PFT. Renovações horárias das instalações sanitárias. Comparação de resultados entre as duas primeiras campanhas.

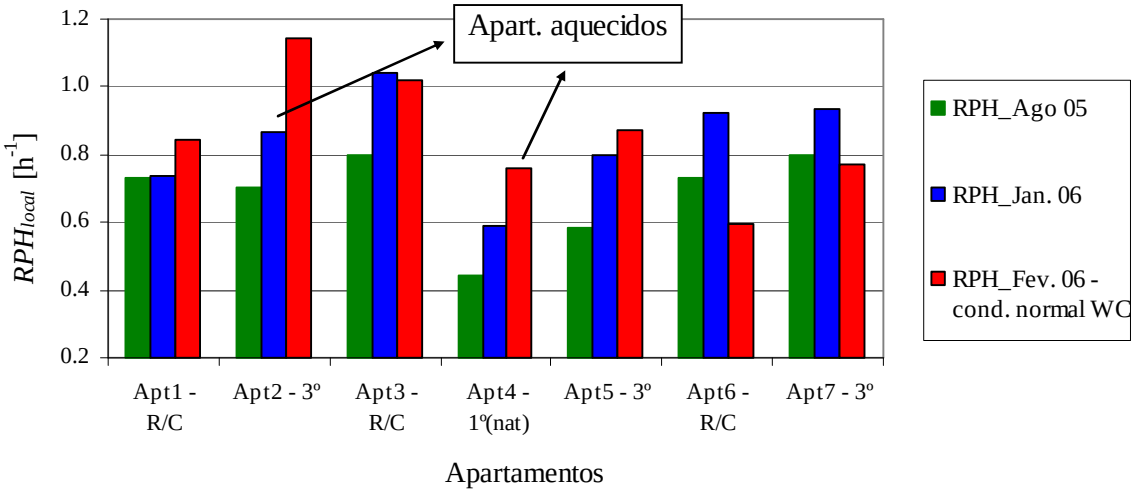


Figura 6.46 - Determinação das renovações horárias pela técnica PFT. Renovações horárias das cozinhas. Comparação de resultados entre as duas primeiras campanhas.

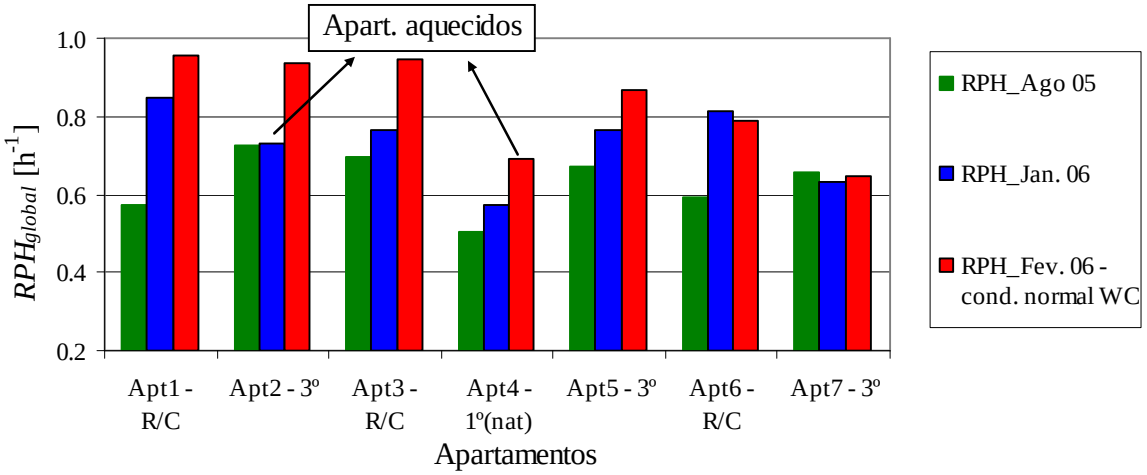


Figura 6.47 - Determinação das renovações horárias pela técnica PFT. Renovações horárias globais. Comparação de resultados entre as duas primeiras campanhas.

Seguidamente apresentam-se as principais conclusões retiradas dos ensaios realizados.

Análise crítica da segunda campanha de ensaios PFT (Inverno 2006)

As principais conclusões a retirar da segunda campanha de ensaios PFT são as seguintes:

- a renovação horária média global para o sistema misto foi a desejada (0,80 h^{-1});
- a influência da velocidade do vento no incremento da renovação horária média global foi significativa;
- a diferença nas renovações horárias, locais ou globais, entre o sistema de ventilação misto e o sistema de ventilação natural foi significativa, sendo muito menor no sistema de ventilação exclusivamente natural;
- o apartamento 1 e o apartamento 7 obtiveram, respectivamente, a mais alta e a mais baixa renovação horária média global obtida em ambas as semanas (retirando o apartamento 4). Provavelmente, este resultado provém da direcção do vento (mais favorável para o apartamento 1);
- o aumento da renovação horária média global entre as 2 semanas fez-se sentir mais nos apartamentos 1 a 5, provavelmente, porque a direcção predominante do vento (SE) é mais favorável para estes;
- nas instalações sanitárias, o incremento da renovação horária média entre as 2 semanas (devidas aos diferenciais na velocidade do vento e temperatura) foi de 25%, o que se sobrepõe à influência da perda de carga da grelha "corrente" instalada na semana 4;
- de um do geral, a variação da renovação horária média da cozinha nos apartamentos com ventilação mecânica foi diminuta (a influência da velocidade do vento foi insignificante);
- os caudais que, potencialmente, foram extraídos pelas condutas do esquentador e instalação sanitária são reduzidos.

Análise crítica comparativa entre as duas primeiras campanhas de ensaios PFT (Verão 2005 e Inverno 2006)

Quanto às renovações horárias obtidas nas instalações sanitárias, pode-se concluir o seguinte (Figura 6.45):

- não se observa acréscimo significativo da renovação horária média entre as 2 campanhas no apartamento 2 (análise comparativa entre Agosto de 2005 e Janeiro de 2006). Em Janeiro de 2006 o apartamento encontrava-se aquecido;
- o incremento positivo entre as 2 campanhas na renovação horária média das instalações sanitárias com conduta modificada foi de 6%;
- o incremento positivo entre as 2 campanhas da renovação horária média das instalações sanitárias com conduta normal foi de 29%, provavelmente, devidas aos diferenciais na velocidade do vento e temperatura.

Quanto às renovações horárias obtidas nas cozinhas, pode-se concluir o seguinte (Figura 6.46):

- o incremento positivo entre as 2 campanhas na renovação horária média da cozinha nos apartamentos com ventilação mecânica foi de 22%, para um incremento médio nos caudais de extracção de 36%;
- a diferença positiva na renovação horária média das cozinhas entre os sistemas de ventilação misto e natural foi de 38%;
- o incremento positivo entre as 2 campanhas na renovação horária média na cozinha do apartamento 4 foi de 53%, provavelmente, devido aos diferenciais na velocidade do vento e temperatura.

Quanto às renovações horárias globais, pode-se concluir o seguinte (Figura 6.47):

- não se nota acréscimo nas renovações horárias globais no apartamento 2 (análise comparativa entre Agosto de 2005 e Janeiro de 2006). Em Janeiro de 2006 o apartamento encontrava-se aquecido e teve um aumento do caudal de extracção da cozinha;

- a um incremento positivo médio de 36% dos caudais na cozinha (sistema misto) entre as 2 campanhas, correspondeu um incremento nas renovações horárias médias globais de 25%;
- o incremento nas renovações horárias globais do apartamento 4 entre as 2 campanhas foi de 24%, provavelmente, devidas aos diferenciais na velocidade do vento e temperatura.

6.5.4. FLUXOS NAS INSTALAÇÕES SANITÁRIAS

Ao longo do trabalho experimental efectuado levou-se a efeito uma série de ensaios, tendo por objectivo avaliar o desempenho das instalações sanitárias, no que diz respeito aos caudais extraídos. Estes foram os seguintes:

- Julho de 2005, no apartamento 1: ensaios em condições de ventilação natural e mecânica na cozinha. Os ensaios de sensibilidade tiveram por objectivo, entre outros, determinar a influência da exaustão mecânica na cozinha, da produção de água quente, da posição das portas (abertas/fechadas) e da posição das grelhas interiores de passagem (abertas/fechadas);
- Agosto de 2005, no apartamento 3: ensaio em condições de ventilação mecânica na cozinha;
- Dezembro de 2005, Fevereiro e Março de 2006, no apartamento 3: ensaios em condições de ventilação natural na cozinha. Os ensaios de sensibilidade tiveram por objectivo, entre outros, determinar a influência do ventilador estático, da grelha de baixa perda de carga, do aquecimento ambiente e do isolamento térmico das condutas.

A série de ensaios que se apresenta agora teve por objectivo determinar, em simultâneo, os caudais extraídos em vários apartamentos, em função da respectiva altura e posição, na situação de ventilação mecânica na cozinha.

Os ensaios decorreram nos meses de Janeiro e Fevereiro de 2006, simultaneamente com a determinação das renovações horárias pela técnica PFT, e tiveram uma duração média de

33 horas. Os caudais foram medidos na cobertura, no caso de medição de 2 apartamentos em simultâneo, ou no 3.º piso. Todas as condutas da instalação sanitária estavam equipadas com grelha de baixa perda de carga e ventilador estático. As condições de registo das variáveis foram as seguintes:

- temperatura exterior: registos espaçados de dez minutos;
- velocidade e direcção do vento: médias de dez minutos de registos espaçados de dez segundos;
- temperatura interior: médias de dez minutos de registos espaçados de três minutos;
- velocidade nas condutas: médias de dez minutos de registos espaçados de dois segundos.

A título exemplificativo, apresentam-se na Figura 6.48 e Figura 6.49, alguns dos caudais determinados nos ensaios em estudo. Pode observar-se na primeira das figuras que o exaustor tem uma ligeira influência nos caudais da instalação sanitária. A um incremento do primeiro corresponde um decréscimo do segundo, principalmente em condições de vento fraco. Na segunda figura observa-se que, para um diferencial de temperatura exterior-interior aproximadamente igual para ambos os casos, o incremento da velocidade do vento é preponderante para se obterem caudais mais elevados, principalmente na conduta do apartamento 2.

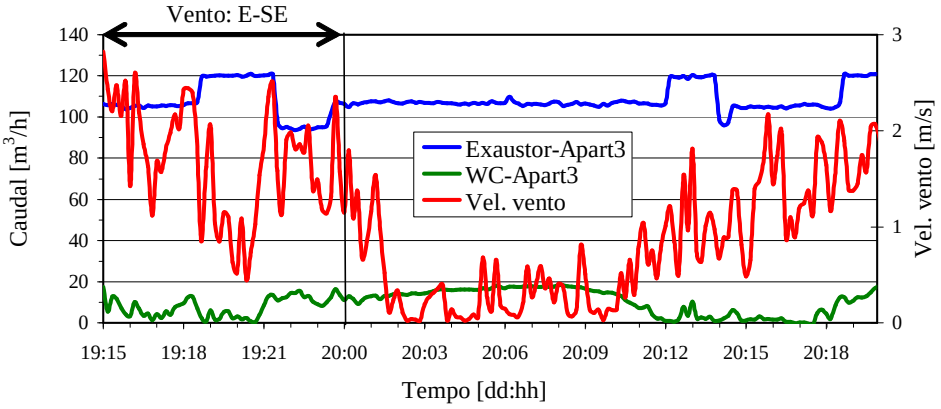


Figura 6.48 - 2ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica PFT. Caudais obtidos na instalação sanitária e cozinha do apartamento 3, entre os dias 19 e 20 de Janeiro.

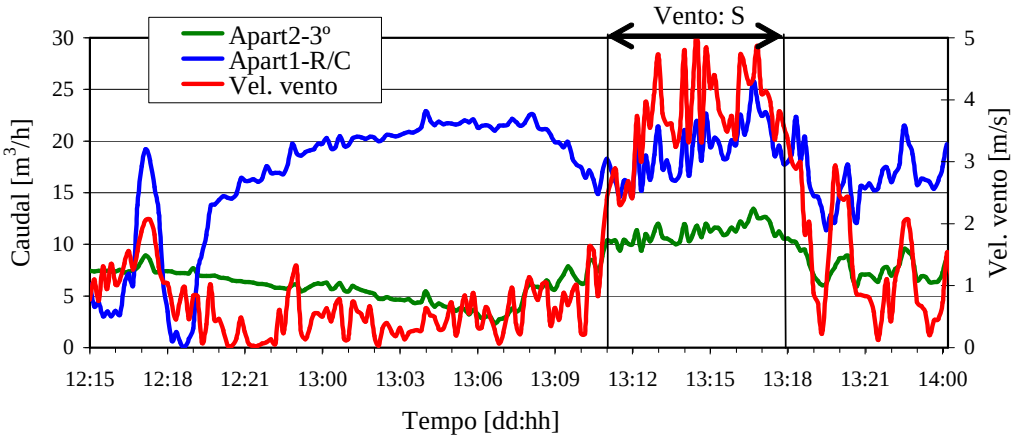


Figura 6.49 - 2ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica PFT. Caudais obtidos nas instalações sanitárias dos apartamentos 1 e 2, entre os dias 12 e 14 de Janeiro.

Apresenta-se no Quadro 6.35 o resumo dos caudais obtidos nas instalações sanitárias durante toda a segunda campanha (na situação de ventilação mecânica na cozinha).

Quadro 6.35 - 2ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica PFT. Caudais obtidos nas instalações sanitárias.

Apart.	Data do ensaio	Caudal médio [m^3/h]	Vento		$\Delta T_{int\text{-}ext}$ [ºC]
			Vel. média [m/s]	Direcção	
1	5 - 6/01/2006	7,1	1,3	SE+S = 31% N = 29%	5,0(1)
1	12 - 14/01/2006	17,0	1,4	SE+S = 54%	4,7
2		7,3			3,7(1)
3	19 - 20/01/2006	9,6	1,1	SE+S = 39%	4,5(1)
3	23 - 24/01/2006	24,9	1,4	SE+S = 37%	7,6(1)
5		10,7			1,7
3	2 - 3/02/2006	5,6	1,3	N+NE = 31% NW = 18%	0,5
5		8,5			1,4(1)
1	6 - 7/02/2006	7,1	1,4	SE = 24% N = 17%	-
2		6,0			-
6	9 - 10/02/2006	7,0	0,7	SE+S = 37%	0,9(1)
7		4,1			-2,4
6	16 - 17/02/2006	24,7	3,5	SW+W = 68% NW = 19%	2,9
7		26,0			2,9(1)
	Média	11,4	1,5		

Nota:
- 1: apartamento aquecido.

Da análise do quadro anterior, podem retirar-se as seguintes conclusões:

- durante os ensaios, a velocidade média do vento foi baixa, à excepção do ensaio entre os dias 16 e 17 de Fevereiro, o que se reflectiu em caudais médios bastante baixos. À semelhança dos ensaios anteriores, estes caudais também poderão ter sofrido influência da exaustão mecânica na cozinha;
- os caudais dependem bastante da velocidade média do vento, como é o caso dos ensaios de 9 a 10 de Fevereiro e 16 a 17 de Fevereiro para os apartamentos 6 e 7. Para estes, um aumento da velocidade do vento de 500%, corresponde um aumento de caudal de 450%. Este aumento verificou-se independentemente da direcção do vento, pois esta alterou-se totalmente entre os dois ensaios;
- para velocidades médias do vento baixas e diferenciais de temperatura também baixos, registaram-se em dois ensaios, 12-14 Janeiro (apartamentos 1 e 2) e 23-24 Janeiro (apartamentos 3 e 5), diferenças substanciais (230%) entre os caudais do R/C e os caudais do 3.º andar, demonstrando a importância do efeito de chaminé.

6.5.5. SÍNTESE CRÍTICA DA SEGUNDA CAMPANHA EXPERIMENTAL

Dos resultados da 2.ª campanha, podem retirar-se as seguintes conclusões principais.

Caudais extraídos na conduta da instalação sanitária em condições de ventilação natural na cozinha

- a velocidade e direcção do vento são preponderantes para se obterem incrementos significativos nos caudais extraídos, tendo mais preponderância que o diferencial de temperatura;
- o isolamento térmico da conduta só se faz sentir quando há aquecimento do ambiente interior;
- a grelha com elevada perda de carga restringe fortemente os respectivos caudais;
- os caudais médios atingidos na conduta modificada são razoáveis, aproximadamente 2 *RPH*.

Caudais extraídos na conduta da instalação sanitária em condições de ventilação mecânica na cozinha

- os caudais dependem bastante da velocidade média do vento;
- os caudais médios obtidos foram bastante baixos. À semelhança dos ensaios da primeira campanha, estes caudais também poderão ter sofrido influência da exaustão mecânica na cozinha;
- para velocidades médias do vento baixas e diferenciais de temperatura também baixos, o efeito de chaminé é importante.

Renovações horárias obtidas pela técnica PFT

- a renovação horária média global para o sistema misto foi a desejada (0,80 h^{-1});
- a influência da velocidade do vento no incremento da renovação horária média global foi significativa;
- a diferença nas renovações horárias, locais ou globais, entre os sistemas de ventilação misto e o sistema de ventilação natural foi significativa, sendo muito menor no sistema de ventilação exclusivamente natural;
- o incremento positivo da renovação horária média no apartamento 4 entre as 2 semanas (devido aos diferenciais na velocidade do vento e temperatura) foi significativo.

6.6. TERCEIRA CAMPANHA EXPERIMENTAL: JANEIRO DE 2007 - APARTAMENTOS OCUPADOS

6.6.1. OBJECTIVO

Pretendia-se nesta terceira campanha determinar as renovações horárias, com os apartamentos habitados, recorrendo à técnica PFT, e aquilatar das concentrações de CO_2 e CO numa cozinha, por acção, principalmente, do funcionamento do esquentador e fogão.

Estes ensaios decorreram no mês de Janeiro de 2007 (semana de 13 a 20). As respectivas condições climáticas exteriores e interiores encontram-se no Anexo B.

Em face das razoáveis renovações horárias obtidas na segunda campanha, e por uma questão comparativa, optou-se por ensaiar os apartamentos com o sistema de ventilação inicialmente projectado, isto é, com um sistema de ventilação natural (ventilação natural na cozinha, com grelha "corrente" e sem isolamento e ventilador estático na conduta da instalação sanitária). Devido a dificuldades de conjugação de planeamento dos residentes, não foi possível ensaiar o apartamento 2. Sendo assim, ensaiou-se o apartamento subjacente (2.º andar). Em face da utilização das habitações, os apartamentos 6 e 7 passaram a ser apartamentos do tipo T3 (o quarto "selado" nas campanhas anteriores deixou de o estar), cuja configuração é apresentada na figura seguinte.

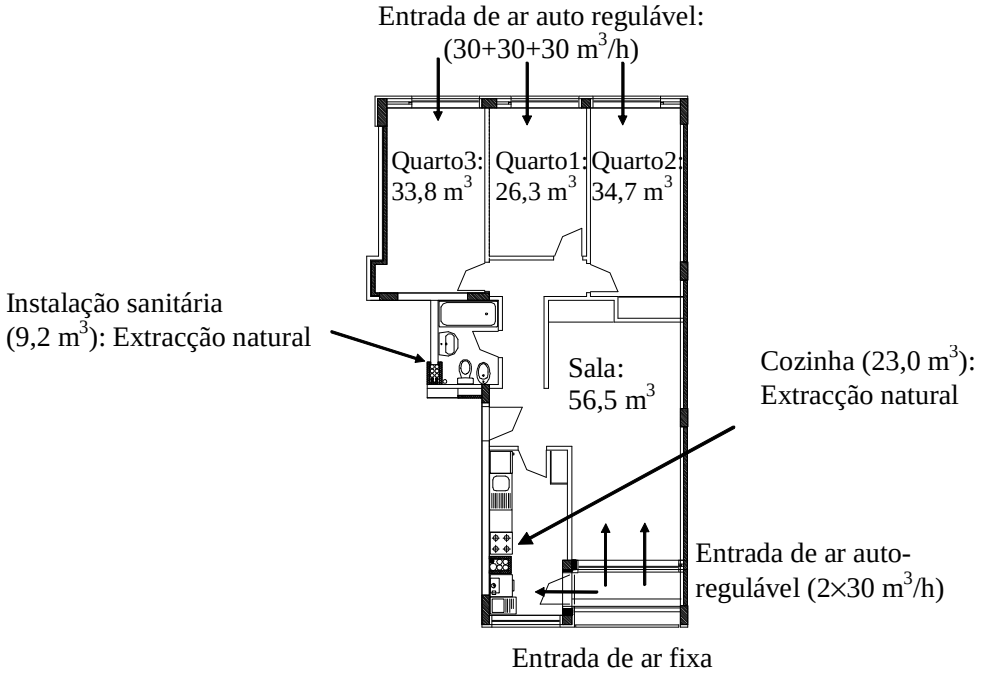


Figura 6.50 - 3.ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica PFT. Apartamentos do tipo T3 (apartamentos 6 e 7).

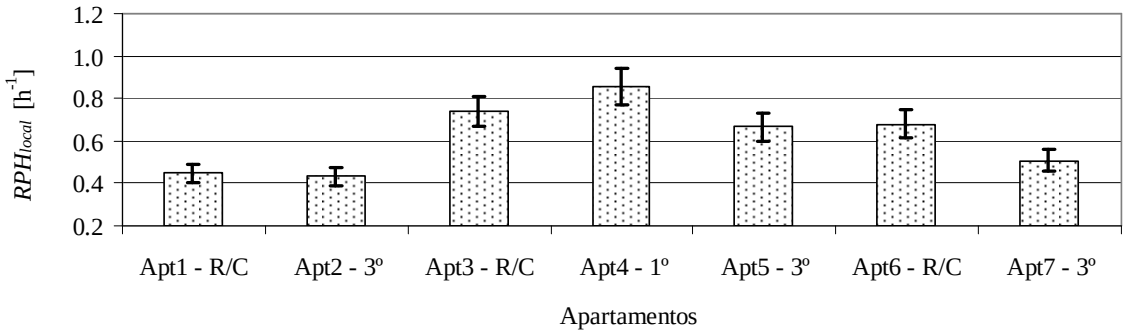
Apresenta-se no Quadro 6.36 a composição do agregado familiar por apartamento onde se pode constatar que se regista uma baixa densidade por apartamento.

Quadro 6.36 - 3.ª campanha. Determinação das renovações horárias pela técnica PFT. Residentes por apartamento e respectiva idade.

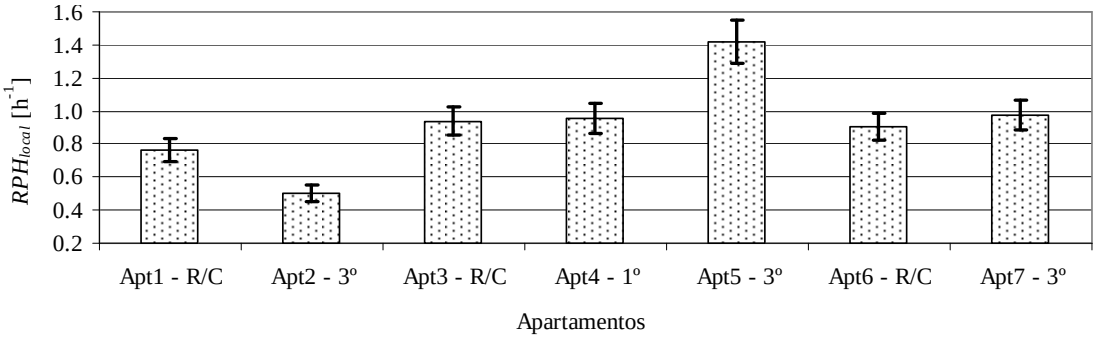
Apart.	Orientação	Crianças/adolescentes (idade)	N.º de adultos (idade)	Total de residentes
1 (R/C) - T2	NE/SW		2 (38; 82)	2
(2.º andar) - T2			3 (23; 53; 54)	3
3 (R/C) - T2	SE/NW	2 (7; 9)	2 (60; 65)	4
4 (1.º andar) - T2		1 (2)	2 (19; 67)	3
5 (3.º andar) - T2		1 (13)	2 (39; 44)	3
6 (R/C) - T3	SW/NE		3 (48; 50; 80)	3
7 (3.º andar) - T3		2 (9; 15)	2 (38; 39)	4

6.6.2. RENOVAÇÕES HORÁRIAS

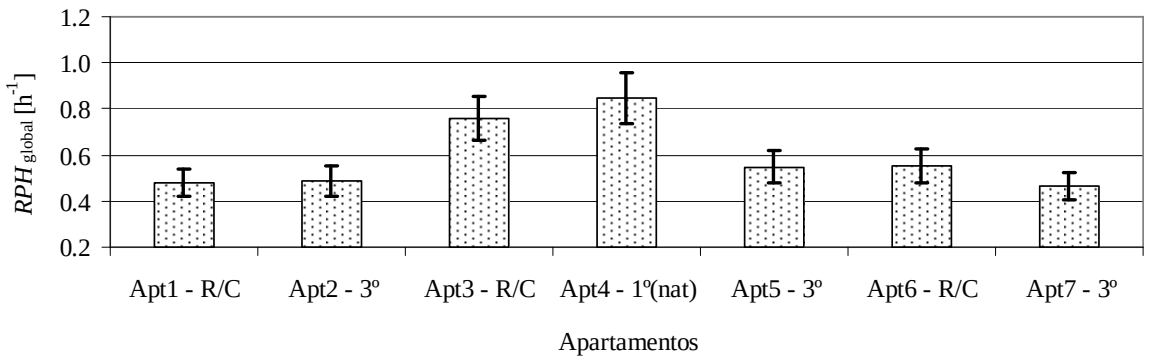
Apresentam-se, na figura seguinte, as médias das renovações horárias da instalação sanitária, da cozinha e dos apartamentos, obtidas com a técnica PFT, com um período de medição de uma semana (incerteza local média de 9,4% e incerteza global de 13%).



a) RPH_{local}: instalações sanitárias.



b) RPH_{local}: cozinhas.



c) RPH_{global}.

Figura 6.51 - 3.ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica PFT.

Pode retirar-se como conclusão principal que a renovação horária média global (0,59 h^{-1}) é muito inferior à obtida nas duas campanhas anteriores, 0,65 h^{-1} na 1.ª campanha e 0,76 h^{-1} ou 0,86 h^{-1}, respectivamente, na semana 2 e semana 4 da 2.ª campanha. A renovação horária global mais elevada do apartamento 4 pode ser explicada pelo facto de ter uma maior diferença de temperatura em relação ao exterior e, simultaneamente, a sua localização ser propícia a ter a fachada principal em pressão, para os ventos predominantes de Este (ver Anexo B).

É de salientar que, comparativamente aos ensaios anteriores, os apartamentos se encontravam habitados, pelo que seria expectável um incremento das renovações horárias derivado da abertura de janelas. Em estudos internacionais refere-se que este incremento poderá ser até 0,8 *RPH*, com uma média de 0,32 *RPH* para habitações ventiladas naturalmente e 0,34 *RPH* para habitações com ventilação mecânica [6.30], [6.31]. No entanto, comparando a média dos resultados do apartamento 4 nas campanhas anteriores (0,59 *RPH*) com o valor de 0,85 *RPH* da presente campanha (ambas as situações com ventilação natural) constata-se que o incremento ficou abaixo do esperado.

6.6.3. CONCENTRAÇÕES DE CO_2 E CO NA COZINHA DE UM APARTAMENTO

Determinaram-se também as concentrações de CO_2 e CO numa cozinha de um apartamento ocupado, por acção, principalmente, do funcionamento do esquentador e fogão. Estes ensaios decorreram entre os dias 13 e 17 de Janeiro num apartamento subjacente ao apartamento 2 (apartamento habitado por 3 adultos).

As concentrações de CO_2 e CO, medidas sob o esquentador, foram memorizadas através de médias de dez minutos de registos espaçados de um minuto (sonda de referência Fluke). Na Figura 6.52 mostram-se as concentrações de CO_2 e CO obtidas na cozinha do apartamento em estudo. Observa-se que ambas as concentrações têm um andamento muito semelhante, coincidindo os valores máximos com os períodos prováveis de confecção das refeições (pequeno almoço, almoço e jantar) ou utilização da instalação sanitária com água quente.

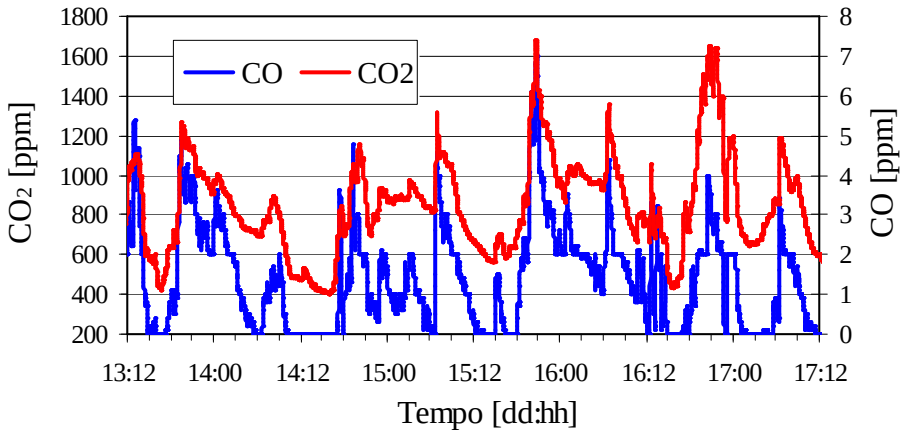


Figura 6.52 - 3.ª campanha: concentrações de CO_2 e CO na cozinha de um apartamento, entre os dias 13 e 17 de Janeiro.

Quanto aos valores médios e extremos registados na cozinha do apartamento em estudo durante o período de ensaio, 13 a 17 de Janeiro, foram os seguintes:

- concentração de CO_2: média = 849 ppm, máxima = 1707 ppm e mínima = 390 ppm;
- concentração de CO: média = 1,4 ppm, máxima = 8,0 ppm e mínima = 0,0 ppm.

Os valores de referência do RSECE [6.32] são os seguintes (ver §2):

- CO_2 = 1800 mg/m^3 (≈1000 ppm a 25ºC): valor excedido em 1337 minutos (22,3 horas);
- CO = 12,5 mg/m^3 (≈ 10,9 ppm a 25ºC): valor não excedido. O valor máximo atingido foi de 8 ppm durante 5 minutos.

Como principal conclusão do ensaio efectuado pode retirar-se que, em face da concentração de CO verificada, em princípio, a combustão dos aparelhos a gás, esquentador e fogão, é feita em boas condições. No entanto, o limite regulamentar de 1000 ppm para o CO_2 foi excedido em aproximadamente 23% do tempo de registo, principalmente, durante os períodos de confecção das refeições no inicio da noite. Neste caso, só com um incremento dos caudais de ar novo, é que seria possível reduzir a respectiva concentração. No entanto, embora o RSECE [6.32] não seja explícito, admite-se que os valores relevantes sejam os valores médios e não os máximos. Sendo assim, o valor médio medido não excede o valor de referência.

6.6.4. SÍNTESE CRÍTICA DA TERCEIRA CAMPANHA EXPERIMENTAL

Desta campanha de ensaios, podem-se retirar as seguintes conclusões:

- a acção do vento, provavelmente com maior incidência no quadrante SE, fez-se sentir, incrementando as renovações horárias, essencialmente, nos apartamentos 3 a 5;
- o apartamento 7 apresenta a renovação horária global mais baixa. Resultado igual também já tinha sido obtido na 2.ª campanha, o que pode ser explicado pela sua localização pouco propicia à acção do vento;
- o uso de condutas de ϕ125 de diâmetro nas instalações sanitárias nos apartamentos 6 e 7 não incrementou os caudais extraídos, relativamente à conduta de ϕ110;
- os apartamentos 6 e 7 do tipo T3 apresentam renovações horárias globais ligeiramente inferiores aos restantes;

- a renovação horária global dos apartamentos regista valores baixos, com uma variação entre 0,46 a 0,85 *RPH* e média de 0,59 *RPH* (ligeiramente inferior ao valor de referência do RCCTE [6.33]). Em face da ocupação, estes resultados podem ter sido influenciados pelos hábitos dos ocupantes, nomeadamente, pelo aquecimento ambiente. Sendo assim, a taxa mais alta obtida no apartamento 4 pode ser explicada pela respectiva temperatura média interior mais alta ou pela exposição da fachada principal aos ventos predominantes de Este;
- em condições de ventilação natural, a influência dos aparelhos do tipo A (fogão) e tipo B (esquentador) é notória nos níveis de CO_2 e CO na cozinha. Em face das concentrações de CO e CO_2, a combustão dos aparelhos a gás, esquentador e fogão, é feita em boas condições e caudais extraídos são suficientes para limitar a concentração média de CO_2 ao limite regulamentar.

6.7. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO

6.7.1. PARÂMETROS AVALIADOS

As condições de conforto foram determinadas recorrendo aos seguintes parâmetros:

- temperatura e humidade relativa exteriores: registos espaçados de dez minutos;
- temperatura do ar e das superfícies e humidade relativa dos compartimentos: registos espaçados de dez minutos;
- temperatura operativa (T_{op}), índices *PMV* (Predicted Mean Vote) e *PPD* (Predicted Percentage Dissatisfied): médias de uma hora de registos espaçados de um minuto;
- taxa de corrente de ar (*DR*) e assimetria de temperatura radiante: médias de uma hora de registos espaçados de um minuto;
- concentração de CO_2: médias de dez minutos de registos espaçados de um minuto.

6.7.2. RESULTADOS

6.7.2.1. Primeira campanha experimental: Verão de 2005 - apartamentos desocupados

A determinação das renovações horárias decorreu entre os dias 2 e 9 de Agosto. Na Figura 6.53 e Figura 6.54 apresentam-se os resultados correspondentes à evolução da temperatura e humidade relativa em cada apartamento entre os dias 3 e 6 de Agosto [6.8], [6.29].

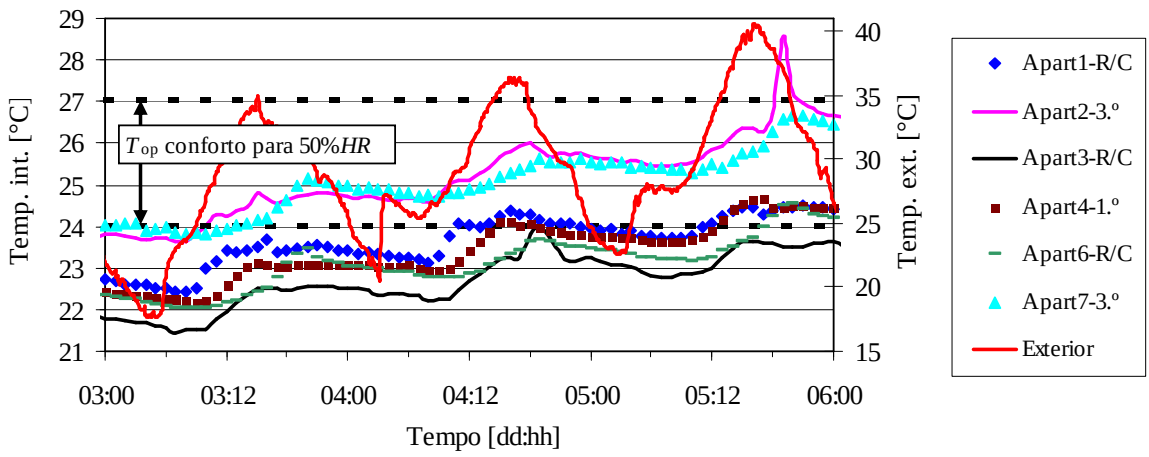


Figura 6.53 - 1.ª campanha: temperatura em cada apartamento entre os dias 3 e 6 de Agosto.

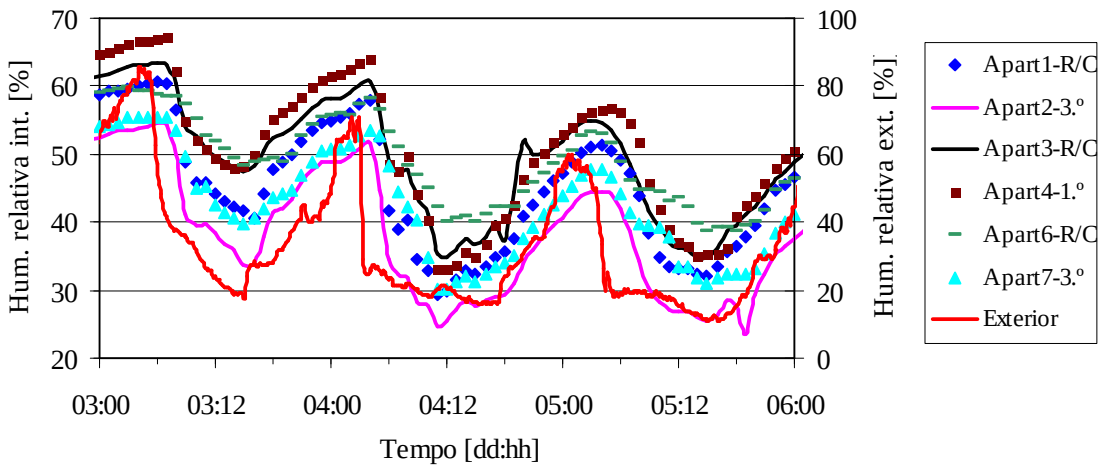


Figura 6.54 - 1.ª campanha: humidade relativa em cada apartamento entre os dias 3 e 6 de Agosto.

O desfasamento entre as condições exteriores e interiores variou de 4 a 15ºC. Segundo a ASHRAE 55: 2004 [6.35], a temperatura máxima registada no interior do apartamento 2 (28,6ºC) e mínima no apartamento 3 (21,4ºC) encontram-se fora dos limites de conforto, assumindo que a temperatura operativa é aproximadamente igual à temperatura ambiente. No fim da semana em análise (2 a 9 de Agosto), os apartamentos tendem a enquadrar-se na gama de valores de conforto (valor não constante da Figura 6.53).

Segundo a mesma norma e para edifícios ventilados naturalmente (modelo adaptativo; ver §2), somente a temperatura máxima é que está fora dos limites de conforto (T_{op} entre 21 a 28ºC). Para este caso, é necessário conhecer a temperatura média mensal de Agosto (22ºC) obtida no Porto - Pedras Rubras, estação meteorológica disponível mais próxima (dados obtidos no site do Instituto de Meteorologia).

As humidades relativas registadas seguem de perto a humidade relativa exterior, uma vez que não existiam fontes de produção de vapor de água.

As temperaturas dos compartimentos do apartamento 5 (fachada principal orientada a SE), durante o 2.º e 3.º dia de Agosto, são apresentadas na Figura 6.55, onde se observa que as temperaturas extremas ocorrem nos compartimentos com a maior e menor exposição à radiação solar (cozinha e instalação sanitária).

Na Figura 6.56 são apresentadas, durante o mesmo intervalo de tempo, as temperaturas superficiais no quarto 1 do apartamento 5 onde se observa que, à semelhança do ocorrido nos compartimentos, as temperaturas extremas ocorrem nas superfícies com maior e menor exposição à radiação solar (tecto e pavimento).

Pode-se concluir que as temperaturas ambientes e superficiais seguem a temperatura exterior e as temperaturas ambientes interiores podem originar situações de desconforto.

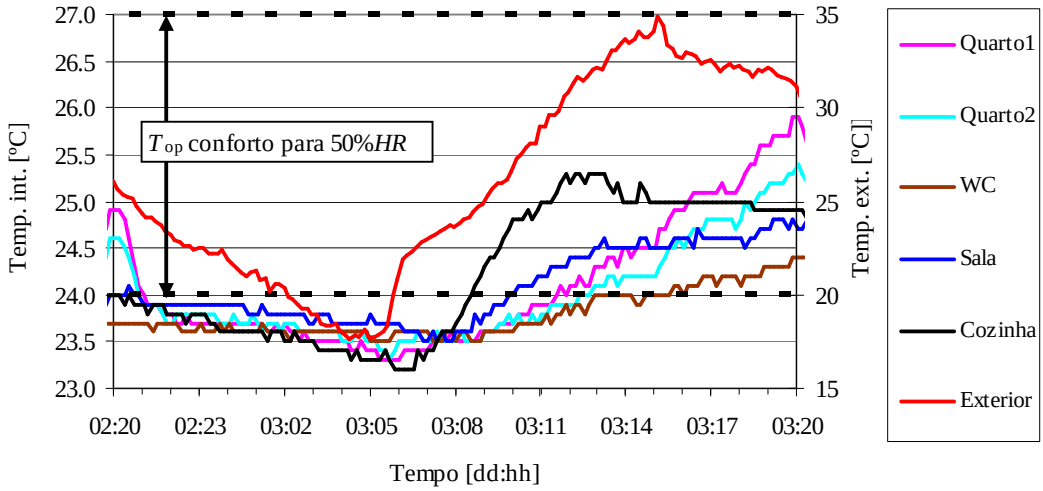


Figura 6.55 - 1.ª campanha: temperaturas dos compartimentos no apartamento 5 nos dias 2 e 3 de Agosto.

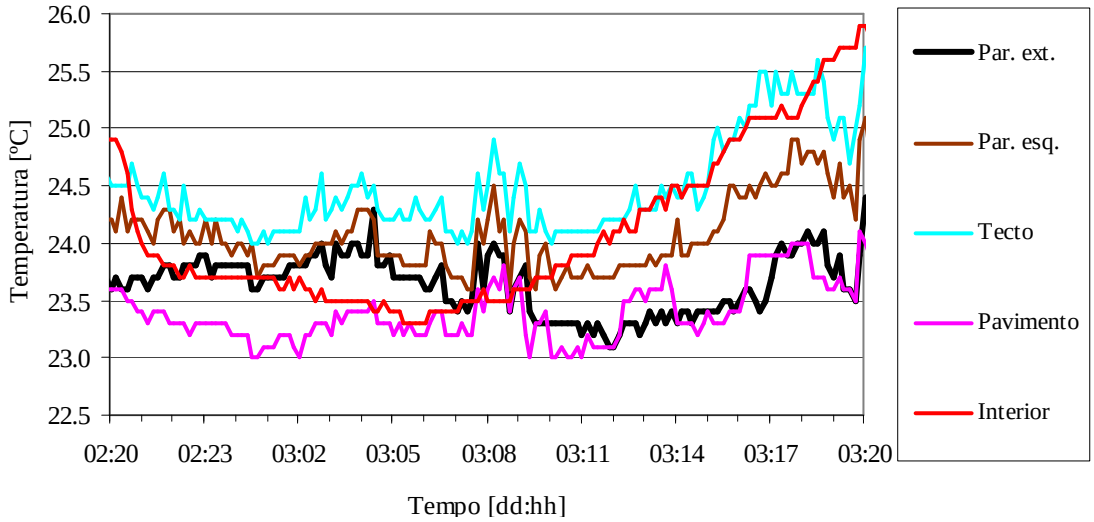


Figura 6.56 - 1.ª campanha: temperaturas superficiais do quarto 1 no apartamento 5 nos dias 2 e 3 de Agosto.

Adicionalmente aos parâmetros anteriores, também se mediram as seguintes variáveis ambientais no quarto 1 e sala dos apartamentos 2, 4 e 5, nos dias 10 e 11 de Agosto [6.8], [6.34] (parâmetros apresentados no §2):

- temperatura do ar (T_{ar});

- temperatura média radiante (T_{mr}) ou temperatura operativa (T_{op});

- humidade relativa (*HR*);

- velocidade relativa do ar (v_{ar}).

De modo a garantir as mesmas condições de ensaio, as protecções solares exteriores constituídas por estores enroláveis de PVC foram mantidas na mesma posição (2/3 do vão obstruído). Os ensaios recorreram a dois analisadores da marca Brüel & Kjær, referência 1213. Os parâmetros foram medidos continuamente, mais especificamente no meio dos compartimentos a uma altura de 0,6 m acima do pavimento (nível do abdómen, para pessoas sentadas), de acordo a norma EN ISO 7726: 2001. Em cada ensaio o período de medição teve uma duração de 1 h.

As medições foram processadas de modo a obterem-se os índices de conforto térmico devidos a Fanger, *PMV* e *PPD*, de acordo com as normas ASHRAE 55: 2004 [6.35] e EN ISO 7730: 2005 [6.36]. Na avaliação destes índices, a taxa metabólica foi fixada em 1,0 *met*[4] (pessoas sentadas e relaxadas) e o nível de vestuário em 0,65 *clo*[5] (situação típica de Verão, incluindo a contribuição de uma cadeira: 0,15 *clo*).

Quatro séries de ensaios foram levadas a efeito simultaneamente no quarto 1 e sala nos três apartamentos referidos. Os resultados dos índices térmicos estão apresentados no Quadro 6.37.

Quadro 6.37 - 1.ª campanha: resultados dos ensaios de conforto térmico.

Ensaio	Apartamento	Compartimento	T_{op} [ºC]	*PMV* [-]	*PPD* [%]	$T_{\text{média exterior}}$ [ºC]
1(1)	4	Sala	23,7	- 0,4	8	19,6
2(1)	5		24,9	0,0	5	
3(1)	4	Quarto1	23,3	- 0,5	10	18,6
4(1)	5		24,7	- 0,1	5	
5(2)	2	Quarto1	24,6	- 0,1	5	21,2
6(2)	5		24,1	- 0,3	7	
7(2)	2	Sala	25,3	+ 0,1	5	27,1
8(2)	5		25,0	0,0	5	

Notas:
- 1: ensaios efectuadas no período da tarde do dia 10;
- 2: ensaios efectuadas no período da manhã do dia 11.

[4] A unidade utilizada para a taxa de metabolismo é designada por met, correspondendo 1 *met* (situação de repouso, acordado) a uma produção de calor por unidade de superfície do corpo humano igual a 58,2 W/m^2.

[5] A resistência térmica convencional do vestuário expressa-se numa unidade denominada de *clo*, sendo 1 *clo* (vestuário típico para Inverno) equivalente a 0,155 m^2·ºC/W.

De acordo com as normas referidas, os índices *PMV* e *PPD* e a temperatura operativa, apresentados no Quadro 6.37, satisfazem os requisitos térmicos para ambientes especificados na categoria B (nível moderado de aceitabilidade: $0{,}5 < PMV < 0{,}5$ e $PPD < 10\%$; ver §2).

Como já referido, se considerarmos o método opcional de determinação das condições de conforto térmico aplicável a edifícios ventilados naturalmente (modelo adaptativo; ver §2), apresentado na norma ASHRAE 55: 2004 [6.35], os resultados obtidos são perfeitamente aceitáveis (T_{op} entre 21 e 28ºC).

Quanto às condições de desconforto local, determinaram-se a taxa de corrente de ar (*DR*) e a assimetria de temperatura radiante tendo-se verificado valores reduzidos (< 1% para *DR* e < 0,6ºC para a assimetria; ver §2) [6.34].

A comparação dos resultados entre os apartamentos 4 e 5 (ensaios 1 a 4), respectivamente situados no 1.º e 3.º andar, demonstra que o apartamento 5 situado sob a cobertura em terraço é ligeiramente mais quente. O facto da temperatura exterior ser inferior à temperatura interior poderá ser explicado pela libertação de calor armazenado na massa da "envolvente interior" (inércia térmica).

No que respeita ao desempenho relativo entre os apartamentos 2 e 5, situados ambos no 3.º andar mas com orientações diferentes, observa-se que o apartamento que recebeu maior radiação solar durante o período de ensaio (apartamento 2), obviamente, atingiu valores mais altos da temperatura operativa.

No que diz respeito ao desempenho relativo entre sistemas de ventilação (apartamentos 2 e 5 com sistema misto e apartamento 4 com sistema de ventilação natural) não se detecta discrepância nos resultados que possam advir dos sistemas de ventilação.

6.7.2.2. Segunda campanha experimental: semana de 12 de Janeiro a 19 de Janeiro de 2006 - apartamentos desocupados

Na Figura 6.57 apresentam-se os resultados correspondentes à evolução da temperatura em cada apartamento entre os dias 13 e 16 de Janeiro. Observa-se que a temperatura tem um

andamento similar em todos os apartamentos, à excepção dos apartamentos 1 e 2, o primeiro por ter sido usado para ensaios na semana anterior (com aquecimento) e o segundo por estar a ser aquecido durante a semana em estudo. Se os apartamentos estivessem habitados, as temperaturas interiores seriam de aproximadamente 15ºC, valor insuficiente para o conforto humano de Inverno, o que realça a necessidade de se recorrer a aquecimento ambiente. A diferença média entre o apartamento 3 (o mais quente) e o apartamento 7 (o mais frio) foi de 1,9ºC. Os apartamentos mais frios situaram-se sob a cobertura (apartamentos 5 e 7).

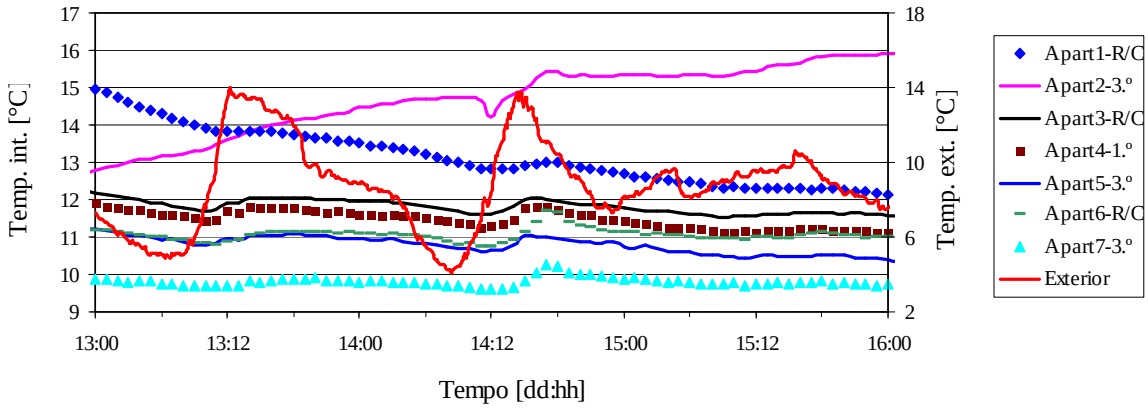


Figura 6.57 - 2.ª campanha: temperatura em cada apartamento entre os dias 13 e 16 de Janeiro.

Não se apresentam os valores da humidade relativa por se julgarem irrelevantes, uma vez que não existiam fontes de produção de vapor de água.

As temperaturas dos compartimentos do apartamento 2, entre os dias 13 e 16 de Janeiro, são apresentadas na Figura 6.58, onde se observa que a instalação sanitária é o compartimento mais frio, com uma diferença média em relação à cozinha de 2,5ºC (provavelmente terá havido falha de energia no dia 14 de Janeiro pelas 9h30m). A análise da evolução da temperatura no fim da semana de ensaio revela que esta começa a estabilizar e situa-se em média nos 19ºC (valor não constante da figura). Segundo a ASHRAE 55: 2004 [6.35], a temperatura operativa mínima na estação de aquecimento, para 50% de humidade relativa, é de aproximadamente 20ºC. Sendo assim, a temperatura

média interior no final da semana de ensaio, com aquecimento, aproximou-se das condições de conforto.

Na Figura 6.59 são apresentadas, durante o mesmo intervalo de tempo, as temperaturas superficiais no quarto 1 do apartamento 2 (fachada principal orientada a NE) onde se observa que as temperaturas extremas ocorrem no tecto e pavimento, com uma diferença média entre elas de 1,6ºC. As temperaturas das superfícies seguem de perto a temperatura no compartimento, no entanto, são superiores a esta (apartamento em aquecimento).

Pode-se concluir que os apartamentos, quando ocupados e não aquecidos, podem originar situações de desconforto térmico.

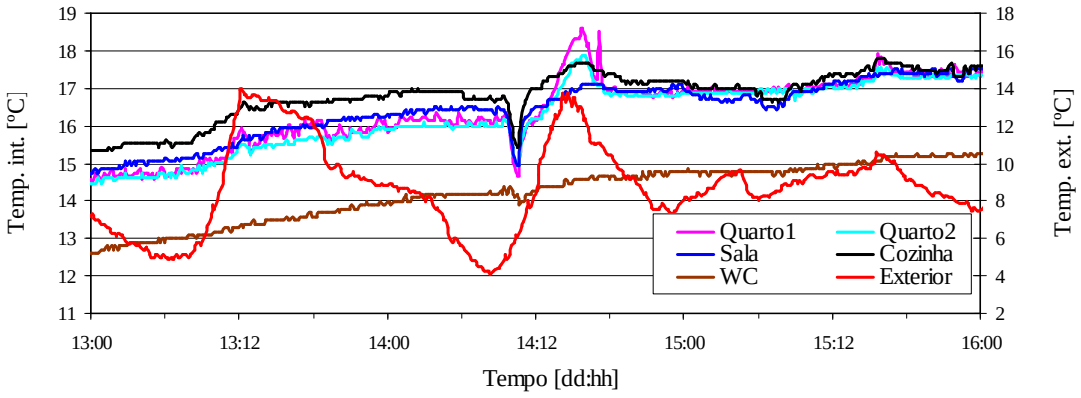


Figura 6.58 - 2.ª campanha: temperaturas dos compartimentos no apartamento 2 entre os dias 13 a 16 de Janeiro.

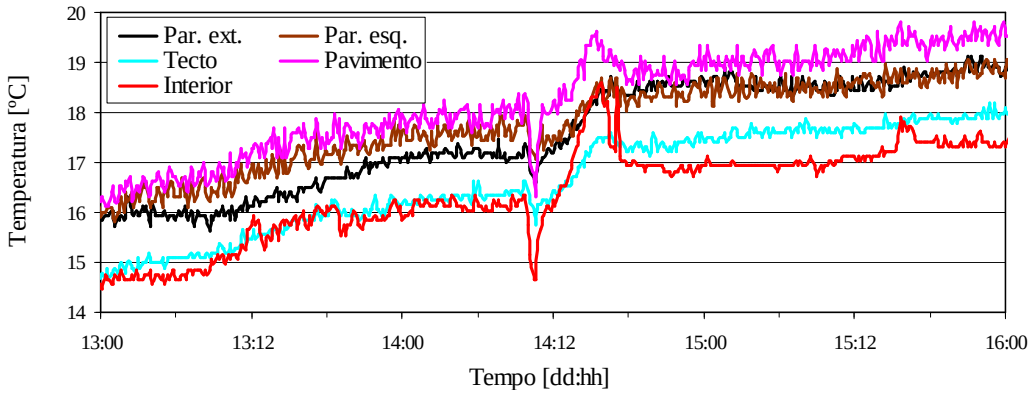


Figura 6.59 - 2.ª campanha: temperaturas superficiais do quarto 1 no apartamento 2 entre os dias 13 e 16 de Janeiro.

6.7.2.3. Terceira campanha experimental: Janeiro de 2007 - apartamentos ocupados

Estes ensaios decorreram no mês de Janeiro de 2007 (semana de 13 a 20). Na Figura 6.60 apresentam-se os resultados correspondentes à evolução da temperatura em cada apartamento entre os dias 13 e 16 de Janeiro. Observa-se que a temperatura tem um andamento similar em todos os apartamentos. A diferença média entre o apartamento 4 (o mais quente) e o apartamento 6 (o mais frio) foi de 2,0ºC.

A temperatura média interior durante o período de ensaio de todos os apartamentos foi de 16,1ºC, revelando que o eventual aquecimento ambiente utilizado é reduzido, ou inexistente, no caso do apartamento 6, levando a situações de desconforto térmico bastante afastadas das condições mínimas ideais (20ºC, segundo o RCCTE [6.33]).

Na Figura 6.61 é apresentada a evolução da humidade relativa nos apartamentos, onde é evidente a ocorrência de ligeiros picos nos períodos de confecção das refeições (pequeno almoço e jantar).

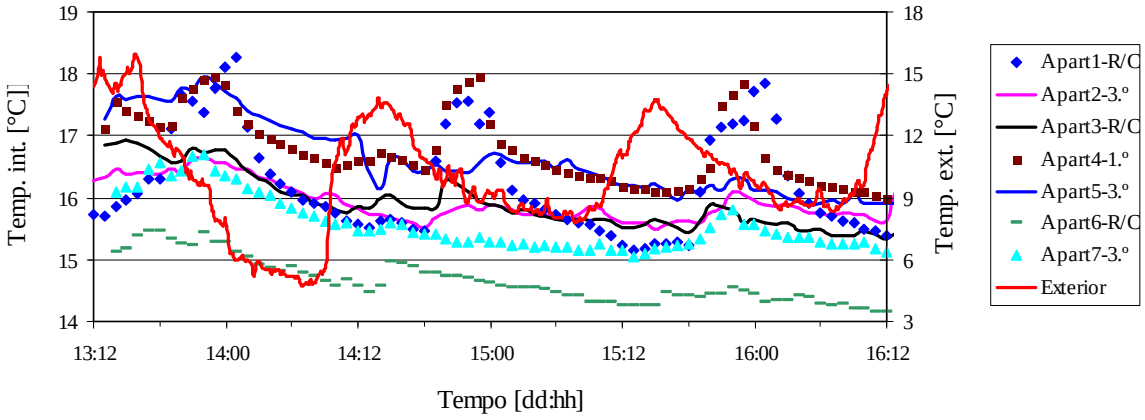


Figura 6.60 - 3.ª campanha: temperatura em cada apartamento entre os dias 13 e 16 de Janeiro.

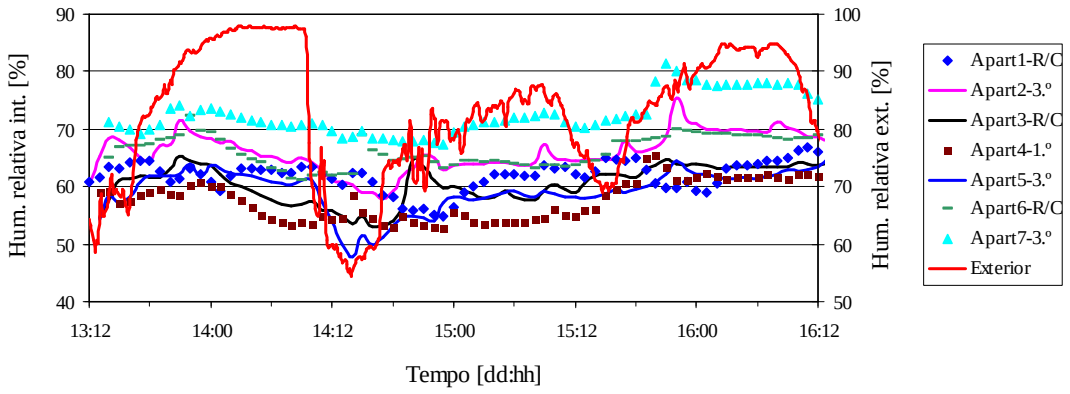


Figura 6.61 - 3.ª campanha: humidade relativa em cada apartamento entre os dias 13 e 16 de Janeiro.

As temperaturas dos compartimentos do apartamento 5, entre os dias 13 e 16 de Janeiro, são apresentadas na Figura 6.62 (devido a dificuldades experimentais somente se apresentam 3 compartimentos), onde se observa que, como era expectável, a sala é o compartimento mais quente (exposta a SE). Na Figura 6.63 é apresentada para os mesmos compartimentos a evolução da humidade relativa, observando-se que a humidade relativa exterior e interior têm andamentos paralelos, demonstrando que, pelo menos nos compartimentos em análise, não há produção significativa de humidade (apartamento habitado por 2 adultos e 1 adolescente). Pontualmente, particularmente no quarto 2 (quarto com maior área e portanto, provavelmente, ocupado pelos 2 adultos), os níveis de humidade relativa ultrapassam os valores máximos recomendados.

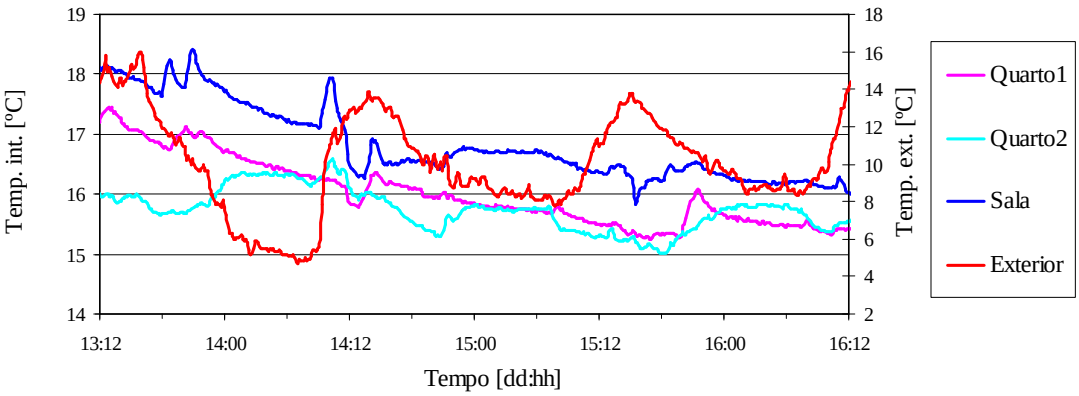


Figura 6.62 - 3.ª campanha: temperaturas dos compartimentos no apartamento 5 entre os dias 13 a 16 de Janeiro.

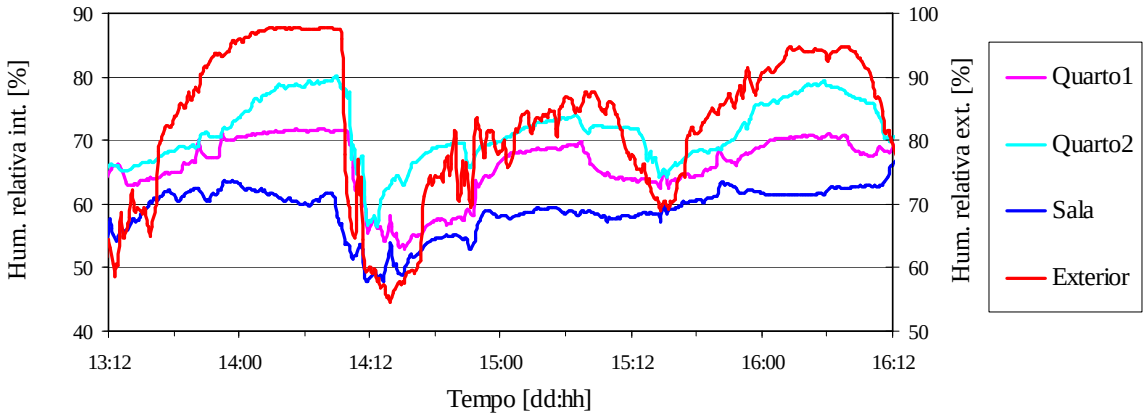


Figura 6.63 - 3.ª campanha: humidade relativa dos compartimentos no apartamento 5 entre os dias 13 a 16 de Janeiro.

Entre os dias 13 e 17 de Janeiro determinaram-se num apartamento subjacente ao apartamento 2 (apartamento habitado por 3 adultos) as concentrações de CO_2, temperatura e humidade relativa na cozinha, por acção, principalmente, do funcionamento do esquentador e fogão. Os resultados encontram-se na Figura 6.64 e Figura 6.65.

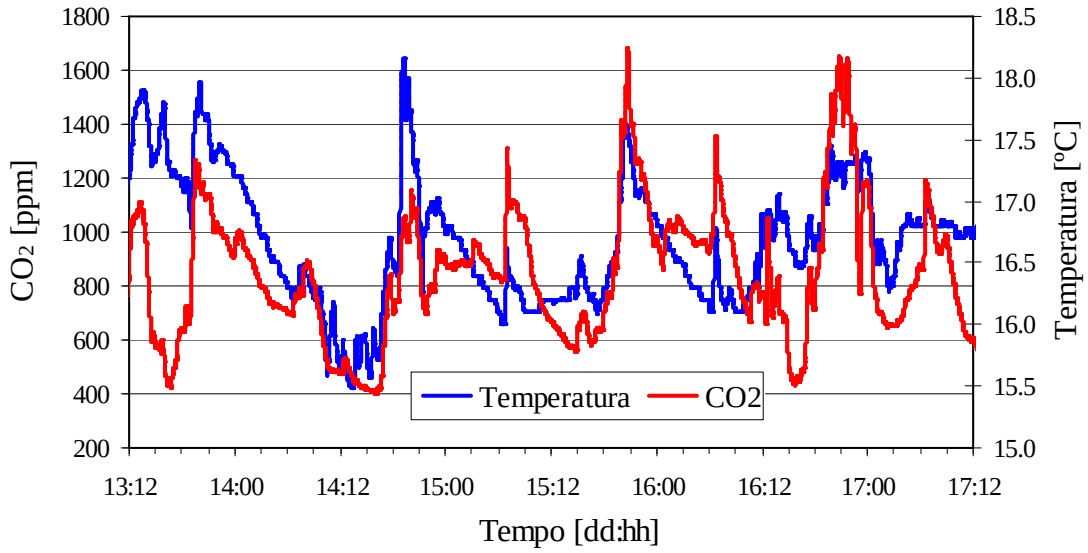


Figura 6.64 - 3.ª campanha: CO_2 e temperatura ambiente na cozinha de um apartamento entre os dias 13 e 17 de Janeiro.

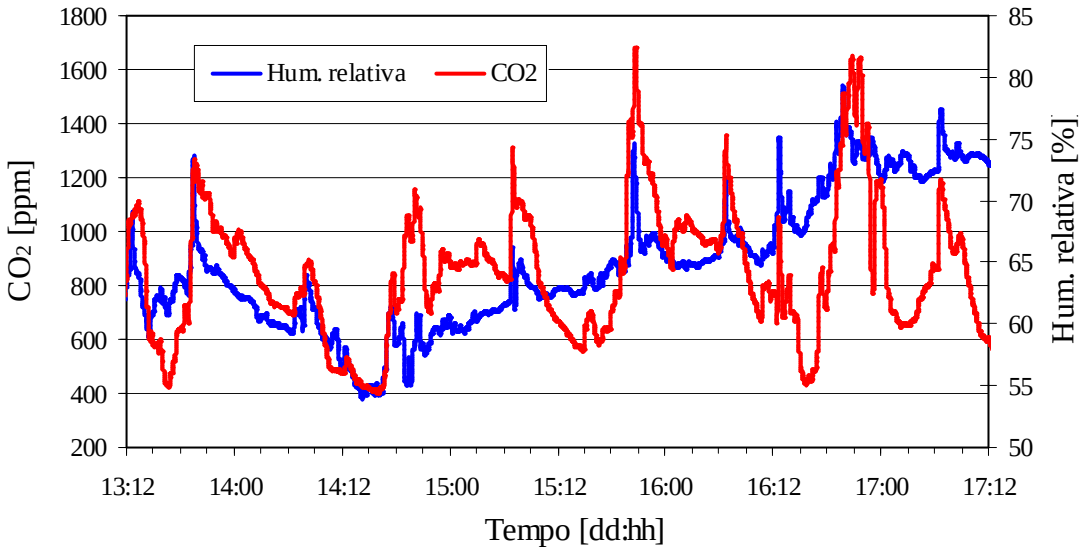


Figura 6.65 - 3.ª campanha: CO_2 e humidade relativa na cozinha de um apartamento entre os dias 13 e 17 de Janeiro.

Observa-se nas figuras anteriores que as variáveis têm um andamento muito semelhante entre si, coincidindo os valores máximos com os períodos prováveis de confecção das refeições (pequeno almoço, almoço e jantar) ou utilização da instalação sanitária com água quente. Pode-se considerar que o valor médio da humidade relativa (65%) não excede os valores máximos recomendáveis. O andamento crescente da humidade relativa, provavelmente, terá a haver com a influência das condições exteriores (ver Anexo B). Os níveis de CO_2 já foram analisados no §6.6.3.

6.7.3. SÍNTESE CRÍTICA DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO

Desta campanha de ensaios, podem-se retirar as seguintes conclusões principais:

- as condições de conforto interiores são fortemente dependentes das condições climáticas exteriores, com maior preponderância nos apartamentos sob a cobertura;
- as condições previsíveis de conforto térmico, com ocupação e sem aquecimento ambiente, são deficientes;
- a adopção dos critérios do modelo adaptativo da norma ASHRAE 55: 2004 (ver §2), aplicável a edifícios ventilados naturalmente, resultam em condições de conforto

mais aceitáveis relativamente às condições de conforto recorrendo aos índices *PMV* e *PPD*;

- a humidade relativa não apresentou, nos apartamentos ocupados ou desocupados, valores extremos;
- as temperaturas extremas ocorreram nos compartimentos com a maior e menor exposição à radiação solar;
- as temperaturas extremas ocorreram nas superfícies com maior e menor exposição à radiação solar. A janela com vidro simples originou assimetrias de temperatura radiante próximas do limite normativo (resultados obtidos na semana 4).

6.8. SÍNTESE CRÍTICA GLOBAL

As principais conclusões de toda a campanha experimental são as seguintes:

Desempenho aerodinâmico dos componentes instalados

- de um modo geral, verifica-se que há alguma discrepância entre os resultados obtidos em laboratório, *in situ* e os do fabricante;
- constatou-se uma elevada permeabilidade ao ar das portas exteriores (cozinha e principal), devido à junta horizontal inferior. Contrariamente, constatou-se uma baixa permeabilidade das portas interiores;
- a grelha "corrente" (*standard*) instalada na conduta de exaustão da instalação sanitária apresenta uma elevada perda de carga.

Permeabilidade global dos apartamentos

- a permeabilidade global (RPH_{50}) apresenta uma grande variação entre os apartamentos ensaiados. No entanto, o valor médio é da ordem do apresentado em bibliografia portuguesa (variação entre 2 a 8 h^{-1});
- o componente com maior contribuição para a permeabilidade global ao ar é a caixa de estores.

Coeficientes de pressão e posicionamento da saída das condutas

- obtiveram-se, genericamente, pressões, quando a fachada está exposta ao vento, e sucções, no caso contrário;
- relativamente ao posicionamento da saída das condutas, verifica-se que a altura é insuficiente. Com excepção das situações particulares, uma altura da saída das condutas a 2,0 m é suficiente.

Posicionamento dos dispositivos

- no caso da ventilação mecânica, o fecho das portas interiores da cozinha e instalação sanitária, independentemente da existência ou não de grelhas de passagem nas respectivas portas, é fundamental para evitar a dispersão da humidade e calor, gerados nos respectivos compartimentos;
- no caso da ventilação natural, a posição das portas e da grelha exterior da cozinha não influencia sensivelmente os caudais extraídos. Se a permeabilidade da envolvente fosse mais reduzida, provavelmente, a posição das portas e o fecho da grelha exterior teriam uma influência maior.

Funcionamento simultâneo do esquentador e exaustão mecânica

- a grelha exterior da cozinha aberta é um bom auxiliar da extracção do esquentador;
- o exaustor parado reduz significativamente os caudais extraídos pela respectiva conduta;
- na posição de tudo fechado (grelhas e portas) o exaustor em funcionamento interfere com os caudais extraídos no esquentador e existe a possibilidade de paragem deste por activação do dispositivo de segurança;
- os caudais extraídos no esquentador e instalação sanitária são influenciados pela exaustão mecânica, reduzindo-os.

Caudais extraídos nas condutas das instalações sanitárias e modificações realizadas na conduta da instalação sanitária

- os caudais extraídos na instalação sanitária, na situação de exaustão mecânica na cozinha, são menores do que na situação de ventilação natural na cozinha;
- no caso de ventilação natural na cozinha, a velocidade e direcção do vento são preponderantes para se obterem incrementos significativos nos caudais extraídos, tendo mais preponderância que o diferencial de temperatura;
- no período de Verão e em situações de baixa velocidade do vento, poderá haver inversão do fluxo;
- o uso de condutas de ϕ125 de diâmetro nas instalações sanitárias nos apartamentos 6 e 7 não incrementou os caudais extraídos, relativamente à conduta de ϕ110;
- a grelha com elevada perda de carga restringe fortemente os respectivos caudais;
- o caudal médio nominal a extrair nas instalações sanitárias de 45 m^3/h, de acordo com a norma portuguesa para ventilação natural, só ocasionalmente foi atingido;
- o ventilador estático e a utilização de grelhas com baixa perda de carga na extracção das instalações sanitárias ($\Delta p_{total\text{-}45m3/h}$ = 2 Pa) foram preponderantes para se obterem acréscimos significativos nas renovações horárias na instalação sanitária relativamente ao apartamento 4 que não recorreu a estes dispositivos;
- os caudais médios atingidos na conduta modificada, na situação de ventilação natural na cozinha, são razoáveis, aproximadamente 2 *RPH*.

Níveis de conforto: temperatura e humidade relativa

- tendo em conta os níveis de temperatura operativa recomendados, de uma forma genérica, os valores medidos, na situação de Inverno em apartamentos ocupados, encontram-se fora dos limites recomendados. Frequentemente, os apartamentos mais desconfortáveis situam-se sob a cobertura;
- a adopção dos critérios dos modelos adaptativos, aplicável a edifícios ventilados naturalmente, resulta em condições de conforto mais aceitáveis relativamente às condições de conforto recorrendo aos índices *PMV* e *PPD*;

- sem aquecimento, as temperaturas extremas ocorrem nos compartimentos com a maior e menor exposição à radiação solar;
- no período de Inverno e sem ocupação, as temperaturas extremas ocorrem nas superfícies com maior e menor exposição à radiação solar, com a assimetria de temperatura radiante a aproximar-se dos valores limites recomendados para superfícies verticais;
- genericamente, os níveis de humidade relativa encontram-se dentro dos limites recomendados.

Níveis de CO_2 e CO na cozinha

- em condições de ventilação natural, a influência dos aparelhos do tipo A (fogão) e tipo B (esquentador) é notória nos níveis de CO_2, CO, temperatura e humidade relativa. A combustão dos aparelhos a gás, esquentador e fogão, é feita em boas condições os caudais extraídos são suficientes para limitar a concentração média de CO_2 ao limite regulamentar.

Renovações horárias obtidas pela técnica PFT

Na Figura 6.66, Figura 6.67 e Figura 6.68 apresenta-se a análise comparativa, respectivamente, das renovações horárias locais das instalações sanitárias, cozinhas e das renovações horárias globais para as 3 campanhas realizadas.

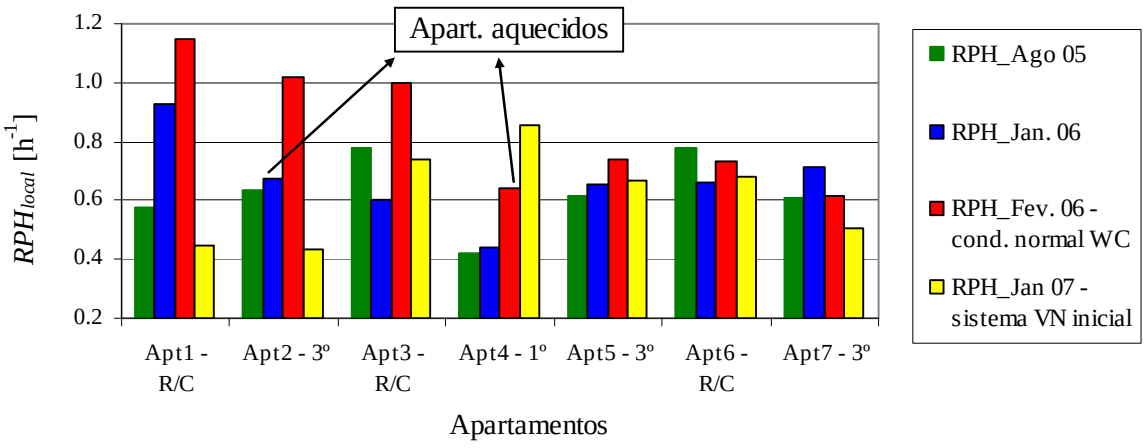


Figura 6.66 - Comparação de resultados entre as 3 campanhas nas instalações sanitárias.

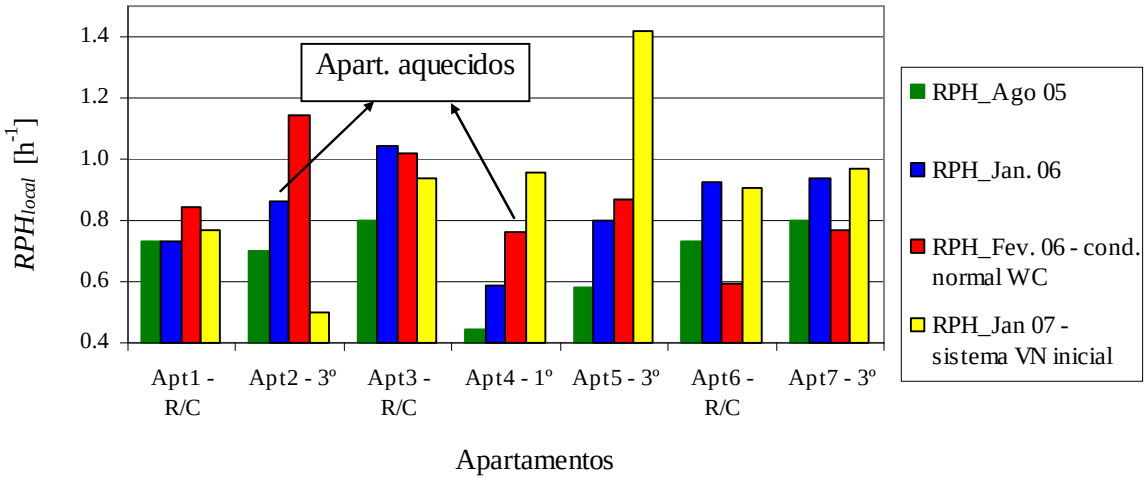


Figura 6.67 - Comparação de resultados entre as 3 campanhas nas cozinhas.

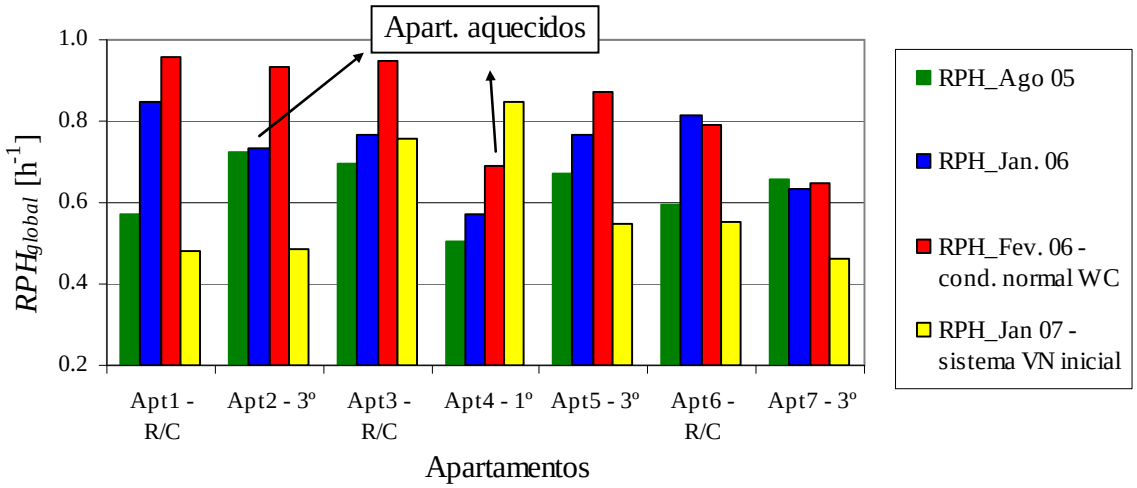


Figura 6.68 - Comparação de resultados entre as 3 campanhas. Renovações horárias globais.

Da análise das figuras anteriores e das conclusões parcelares já apresentadas resulta o seguinte:

- o apartamento 4, que recorreu exclusivamente à ventilação natural e que não possuía ventilador estático nem grelha de desempenho melhorado na instalação sanitária, apresentou um desempenho inferior no que diz respeito às renovações horárias, locais ou globais;

- a influência da velocidade do vento e temperatura na renovação horária média global no apartamento 4 foi significativa;
- apesar da exaustão mecânica recorrer a caudais reduzidos na cozinha, os caudais por via da ventilação natural (apartamento 4) são ainda inferiores. Algumas renovações horárias locais na cozinha mais elevadas na 3.ª campanha poderão ser explicadas pela entrada preferencial de ar novo directamente para este compartimento, nomeadamente, pela abertura da porta exterior;
- a influência da velocidade do vento no incremento da renovação horária global foi significativa e fez-se sentir essencialmente nos apartamentos sob a cobertura e na instalação sanitária;
- os casos de baixa renovação horária global surgem, essencialmente, no piso do R/C e no caso do apartamento com sistema de ventilação exclusivamente natural (apartamento 4);
- a diferença nas renovações horárias, locais ou globais, entre o sistema de ventilação misto e o sistema de ventilação natural foi significativa, sendo muito menor no sistema de ventilação exclusivamente natural;
- os caudais nas condutas do esquentador e instalação sanitária, medidos indirectamente, são bastante reduzidos e as renovações horárias globais do sistema misto, na situação de Inverno (apartamentos desocupados), foram as esperadas (0,80 h^{-1}). Estas taxas variam ligeiramente com a localização em termos de altura e orientação dos apartamentos;
- a análise da 3.ª campanha (ventilação natural na cozinha) revela que os resultados não são homogéneos entre si o que pode demonstrar a grande influência dos factores naturais (vento e temperatura) e da acção humana por abertura das janelas e aquecimento ambiente. Pontualmente, apresentam resultados superiores aos das campanhas anteriores.

Adequabilidade do método do gás traçador

- a técnica da concentração constante mostrou-se adequada para determinar caudais “instantâneos” de ar novo em cada compartimento;

- a técnica do declive mostrou-se adequada, pela proximidade dos resultados em relação à técnica PFT, para obter resultados pontuais em condições moderadas de vento;
- a técnica PFT mostrou-se adequada para obter resultados médios com a vantagem de ser uma técnica não intrusiva.

BIBLIOGRAFIA DO CAPÍTULO 6

[6.1] IPQ, Ventilação e Evacuação dos Produtos da Combustão dos Locais com Aparelhos a Gás. Parte 1: Edifícios de Habitação. Ventilação Natural, Instituto Português da Qualidade, NP 1037-1, Monte da Caparica, 2002.

[6.2] Pinto, A., Ventilação Mecânica de Edifícios de Habitação, LNEC, NCI, Relatório 01/2006, 2006.

[6.3] ASHRAE, Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Low-Rise Residential Buildings, Ansi/Ashrae Standard 62.2-2007, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA, 2007.

[6.4] Liddament, M., A Guide to Energy Efficient Ventilation, Annex 5-AIVC, IEA-ECBCS, 1996.

[6.5] CSTC, Ventilation des Cuisines et Hottes Aspirantes, Note d´Information Technique 187, Centre Scientifique et Technique de la Construction, Brussels, 1993.

[6.6] Tip-vent, Towards Improved Performances of Mechanical Ventilation Systems, Tip-vent Source Book, EU programme: Non Nuclear Energy Programme Joule IV, 2001.

[6.7] Pinto; M.; Freitas, V.; Viegas, J., Experimental Characterization of Hybrid Ventilation Systems in Residential Buildings, 26th AIVC Conference, Brussels, Belgium, 2005.

[6.8] Pinto, M. *et al*, Residential Hybrid Ventilation Systems in Portugal: Experimental Characterization, 8th Healthy Buildings Conference, Lisbon, Portugal, 2006.

[6.9] Pinto, M.; Freitas, V., Importância da Ventilação nas Condensações Superficiais - Medição das Renovações Horárias pela Técnica PFT, 1.º Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, Porto, 2003.

[6.10] Pinto, M. et al, Air Change Rates in Multi-Family Residential Buildings in Northern Portugal, 7th Healthy Buildings Conference, National University of Singapore, Singapore, 2003.

[6.11] Stymne H., Monitoring of Ventilation Rate and Air Distribution Patterns in an Apartment Block using the Homogeneous Emission Technique, Joint Research Centre, Ispra, Italy, Final report contract n.º 5607-93-11 EI ISP S, 1994.

[6.12] AFNOR, Composants de Ventilation Mécanique Contrôlée. Entrées d'Air en Façade. Caractéristiques et Aptitude à la Fonction, Association Française de Normalisation, NF E 51-732, Paris, France, 2005.

[6.13] Pinto, A., Qualificação Experimental de um Caixilho do Conjunto Habitacional de Areias em Gondomar. Ensaio do Protótipo da Caixilharia. Projecto POCTI/ECM/45555/2002, Edifícios - Nota Técnica 01/2005 - NCI, LNEC, 2005.

[6.14] Pinto, A., Recomendações para Limites da Permeabilidade ao Ar da Envolvente, Seminário sobre Aplicação da Ventilação Natural e Mista, LNEC, Lisboa, 2007.

[6.15] Viegas, J., Componentes de Edifícios. Selecção de Caixilharia e seu Dimensionamento Mecânico, ITE 51, LNEC, 2006.

[6.16] IPQ, Ventilação de Edifícios. Ensaios de Desempenho dos Componentes/Produtos para Ventilação de Edifícios de Habitação. Parte 1: Dispositivos de Passagem de Ar Montados no Exterior e no Interior, Instituto Português da Qualidade, NP EN 13141-1, Monte da Caparica, 2006.

[6.17] Pinto, A., Ensaio de Componentes de Edifícios. Calibração de Instrumentos para Medição de Caudais de Ar, Relatório 26/01-NCCp, LNEC, 2001.

[6.18] CEN, Ventilation for Buildings. Performance Testing of Components/Products for Residential Ventilation. Part 5: Cowls and Roof Outlet Terminal Devices, prEN 13 141-5, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1998.

[6.19] AFNOR, Ventilation. Conduits de Ventilation Naturelle et Conduits de Fumée. Code d´Essai et Classement des Extracteurs Statique, Association Française de Normalisation, NF P 50-413, Paris, France, 1993.

[6.20] Silva, F., Caracterização da Distribuição de Pressões na Envolvente de um Conjunto de Edifícios Situados em Gondomar, Nota Técnica 1/2007-NOE-A, LNEC, 2007.

[6.21] Viegas, J. *et al*, Ventilation of Dwellings: Requirements and Experiments, XXX IAHS World Congress on Housing, Coimbra, Portugal, 2002.

[6.22] Gomes, M., Acção do Vento em Edifícios. Determinação de Coeficientes de Pressão em Edifícios em L e U, Tese de Mestrado Submetida ao IST, Lisboa, 2003.

[6.23] IPQ, Caldeiras de Aquecimento Central que Utilizam Combustíveis Gasosos. Caldeiras do Tipo B_{11} e B_{11BS} Equipadas de Queimadores Atmosféricos em que o Débito Calorífico Nominal é Inferior ou Igual a 70 kW, Instituto Português da Qualidade, NP EN 297, Monte da Caparica, 1998.

[6.24] Viegas, J.; Pinto, A.; Pinto, M., The influence of Ventilation in the Work of Domestic Combustion Appliances, 10th Roomvent Conference, Helsinki, Finland, 2007.

[6.25] Viegas, J. *et al*, Assessment of the Performance of Natural Ventilation in an Apartment Building, 8th Roomvent Conference, Copenhagen, Denmark, 2002.

[6.26] Viegas, J., Aplicação da norma NP 1037-1 : 2002, Seminário sobre Aplicação da Ventilação Natural e Mista, LNEC, 2007.

[6.27] Ventura, F.; Viegas, J., Modelação da Ventilação Natural numa Habitação, Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería 2005, Granada, España, 2005.

[6.28] Viegas, J., Matias, L.; Pinto, A., Natural Ventilation of an Apartment: a Case Study, 9th Roomvent Conference, Coimbra, Portugal, 2004.

[6.29] Pinto, M; Freitas, V., O Desempenho das Construções com Ventilação Natural e Mista II, Seminário sobre Aplicação da Ventilação Natural e Mista, LNEC, 2007.

[6.30] Concannon, P., Residential Ventilation, Technical Note 57, Annex 5-AIVC, IEA-ECBCS, 2002.

[6.31] Price, P.; Sherman, M., Ventilation Behavior and Household Characteristics in New California Houses, Technical Report LBNL-59 620, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, USA, 2006.

[6.32] Decreto-Lei n.º 79/2006, Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização (RSECE), 4 de Abril, Diário da República, I Série-A, Lisboa, 2006.

[6.33] Decreto-Lei n.º 80/2006, Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), 4 de Abril, Diário da República, I Série-A, Lisboa, 2006.

[6.34] Matias, L., Avaliação das Condições Ambientes em Três Fogos de um Edifício em Areias - Gondomar (Projecto FCT Ref.ª POCTI/ECM/45555/2002). Verão de 2005, Relatório 36/06 - NRI, LNEC, 2006.

[6.35] ASHRAE, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Ansi/Ashrae Standard 55-2004, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA, 2004.

[6.36] ISO, Ergonomics of the Thermal Environment. Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria, ISO 7730, International Organization for Standardization, Geneva, 2005.

7. CONCLUSÕES

7.1. CONCLUSÕES PRINCIPAIS

A realização da presente tese teve como objectivo central o estudo experimental e a optimização de um sistema de ventilação misto de forma a tirar ilações sobre o seu funcionamento e propor recomendações para a concepção do referido sistema.

No âmbito do trabalho foram sendo atingidos objectivos parcelares que permitiram:

- enquadrar a ventilação na temática da qualidade do ambiente interior em edifícios de habitação;
- sintetizar quais os modelos que permitem uma adequada modelização dos fenómenos que regem a ventilação;
- sintetizar quais as técnicas experimentais que permitem quantificar os fluxos de ar que ocorrem em espaços de habitação;
- realizar um levantamento da normalização e regulamentação aplicável aos sistemas de ventilação em edifícios de habitação em Portugal. Complementarmente, realizou-se um inquérito e resumiram-se os estudos existentes em Portugal sobre os sistemas de ventilação efectivamente implementados. Por fim, realizou-se uma análise comparativa entre os mesmos;
- realizar ensaios prévios envolvendo o método do gás traçador e introdução em Portugal da técnica PFT. Os ensaios permitiram realizar estudos de sensibilidade sobre as diversas técnicas aplicadas a um sistema de ventilação intermitente (Universidade de Gävle - Suécia);

- realizar um ensaio exploratório a um sistema de ventilação misto num apartamento do tipo T2, localizado no concelho da Maia, que evidenciou renovações horárias anormalmente baixas;
- realizar uma resenha da terminologia, apresentada em anexo, correntemente aplicada à área da ventilação, de modo a facilitar a comunicação entre os diversos intervenientes.

Quanto à regulamentação e normalização internacional e aos sistemas de ventilação utilizados em Portugal, pode afirmar-se o seguinte:

- a regulamentação e normalização internacional tendem, em média, à excepção das pequenas habitações, para um valor médio de 0,4 *RPH*, o que se revela um pouco inferior ao que é recomendado em Portugal pela regulamentação energética (RCCTE);
- o sistema de ventilação com maior implantação em edifícios de habitação em Portugal é um sistema do tipo misto, com ventilação mecânica intermitente na cozinha e ventilação natural nas instalações sanitárias;
- os sistemas usados raramente incluem grelhas de admissão de ar, tanto nos sistemas de ventilação natural, como nos sistemas de ventilação mecânica;
- o projecto de ventilação ainda não é prática corrente e, quando existe, é incipiente.

O desenvolvimento do objectivo central, o estudo experimental e a optimização de um sistema de ventilação misto, implicou um conjunto de ensaios aos dispositivos que correntemente fazem parte dos sistemas. Desta caracterização, concluiu-se o seguinte:

- as características técnicas divulgadas comercialmente pelos fabricantes das grelhas auto-reguláveis, correntemente aplicadas em obra, podem não corresponder ao seu desempenho efectivo;
- as portas exteriores, correntemente usadas, têm elevada permeabilidade ao ar. Em contraponto, as portas interiores, com vedação de frincha, têm permeabilidade reduzida;

- a grelha plástica, correntemente instalada nas instalações sanitárias, evidencia uma elevada perda de carga;
- a caixa de estores é o componente com maior contribuição percentual para a permeabilidade global dos apartamentos;
- a permeabilidade global dos apartamentos apresenta uma grande variação. No entanto, o valor médio é semelhante ao apresentado em bibliografia portuguesa, aproximadamente 6 *RPH*.

A caracterização experimental do sistema de ventilação misto permitiu realizar uma análise de sensibilidade do funcionamento em simultâneo do esquentador e exaustor. Desta análise, retiraram-se as seguintes conclusões:

- o fecho das portas interiores da cozinha e instalação sanitária é fundamental para evitar a dispersão da humidade e calor gerados nos respectivos compartimentos;
- quando há exaustão mecânica na cozinha, a grelha exterior deste compartimento é um bom auxiliar do funcionamento do esquentador e pode evitar inversões de fluxo na instalação sanitária;
- o exaustor desactivado reduz significativamente os caudais extraídos;
- quando a grelha exterior da cozinha e das portas estão fechadas, o exaustor em funcionamento interfere com os caudais extraídos no esquentador e existe a possibilidade de paragem deste, por activação do dispositivo de segurança. Os caudais extraídos na instalação sanitária são menores do que na situação de ventilação natural.

O estudo experimental também permitiu avaliar a influência da configuração do sistema de ventilação da instalação sanitária no caudal extraído, na situação de ventilação natural na cozinha. Tendo-se concluído o seguinte:

- a velocidade do vento tem mais preponderância que o diferencial de temperatura no incremento dos caudais;
- o isolamento térmico da conduta faz-se sentir só na situação de aquecimento ambiente;

- a situação de grelha com baixa perda de carga e ventilador estático (na instalação sanitária) revelou-se a mais favorável para se obterem caudais mais elevados;
- na situação de não utilização (sem aquecimento das águas sanitárias ou sem aquecimento ambiente), os caudais médios atingidos na conduta modificada (inclui grelha com baixa perda de carga e ventilador estático) são razoáveis, aproximadamente 2 *RPH*. Na situação de velocidade do vento com valores médios próximos aos das normais do local (4-6 m/s), os valores atingidos seriam razoavelmente superiores. No entanto, dificilmente, o valor nominal de cálculo (45 m^3/h) seria atingido;
- o principal obstáculo na prossecução de caudais razoáveis é a grelha fixa de extracção.

A caracterização experimental do sistema de ventilação misto também permitiu a determinação dos caudais extraídos nas instalações sanitárias de vários apartamentos, em função da respectiva altura em relação ao solo e posição no edifício, na situação de ventilação mecânica na cozinha. Destes ensaios, concluiu-se o seguinte:

- os caudais dependem bastante da velocidade média do vento. Durante os ensaios a velocidade média do vento foi baixa, o que se reflectiu em caudais médios bastante baixos e menores do que na situação de ventilação natural na cozinha;
- para velocidades médias do vento baixas e diferenciais de temperatura também baixos, o efeito de chaminé foi preponderante (caudais mais elevados para altura da conduta maior).

Complementarmente, realizaram-se alguns ensaios na situação de ocupação dos apartamentos e de ventilação natural na cozinha. Estes revelaram o seguinte:

- a temperatura média interior durante o período de ensaio de todos os apartamentos foi baixa, revelando que o eventual aquecimento ambiente é reduzido, ou inexistente, levando a situações de desconforto térmico bastante afastadas das condições mínimas ideais;
- a evolução da humidade relativa nos apartamentos evidencia a ocorrência de ligeiros picos no período de confecção das refeições (pequeno almoço e jantar).

Pontualmente, os níveis de humidade relativa ultrapassam os valores máximos recomendados;

- as concentrações de CO_2 e CO revelam que os valores máximos coincidem com os períodos prováveis de confecção das refeições (pequeno almoço, almoço e jantar) ou utilização da instalação sanitária com água quente. O valor médio de CO_2 não excede o valor de referência;
- em face da concentração de CO verificada, em princípio, a combustão dos aparelhos a gás, esquentador e fogão, é feita em boas condições;
- a renovação horária média global foi bastante inferior à obtida nas campanhas com o sistema de ventilação misto.

Quanto às renovações horárias e caudais obtidos nas três campanhas experimentais, resulta o seguinte:

- apesar da exaustão mecânica recorrer a caudais reduzidos na cozinha, os caudais por via da ventilação natural (apartamento 4) são ainda inferiores;
- a influência da velocidade do vento no incremento da renovação horária global foi significativa e fez-se sentir essencialmente nos apartamentos sob a cobertura e nas instalações sanitárias;
- os casos de baixa renovação horária global surgem, essencialmente, no piso do R/C, menor exposição à acção do vento, e no caso do apartamento com sistema de ventilação exclusivamente natural (apartamento 4);
- a diferença nas renovações horárias, locais ou globais, entre o sistema de ventilação misto e o sistema de ventilação natural foi significativa, sendo muito menor no sistema de ventilação exclusivamente natural.

7.2. PRINCIPAIS RECOMENDAÇÕES PARA A CONCEPÇÃO DE UM SISTEMA MISTO DE VENTILAÇÃO

De todos os ensaios levados a efeito resultam as seguintes recomendações para a concepção de um sistema misto de ventilação.

Princípios gerais dos sistemas mistos

- o sistema de ventilação misto das habitações deve ser geral e permanente, ou seja, devem existir aberturas permanentes auto-reguláveis para admissão de ar aos compartimentos principais, quartos e salas. Por outro lado, todos os compartimentos de serviço devem dispor de extracções cujo somatório dos caudais proporcione um equilíbrio entre a eficiência energética, a qualidade do ar e o risco de condensações;
- os vãos de uma mesma habitação em comunicação com o exterior devem, preferencialmente, ser localizados em fachadas de orientação diferente de maneira a permitir o aproveitamento da diferença de pressões provocada pela acção do vento para aumentar a eficácia da ventilação;
- preferencialmente, não deve ser permitida a coexistência entre a exaustão mecânica na cozinha e um aparelho de combustão para aquecimento ambiente ou de águas sanitárias do tipo B (o ar comburente é captado directamente no local de instalação). Sendo assim, recomenda-se a localização deste em compartimento separado (ex.: lavandaria) com ventilação separada.

Admissão de ar

- recomenda-se o uso de grelhas auto-reguláveis de admissão de ar que garantam caudal nominal para 10 Pa ou valor inferior. Por outro lado, deve exigir-se a estes dispositivos um nível de isolamento acústico superior a 30 ou 33 dB, em função da solicitação acústica, em qualquer frequência, e a estanquidade à água, em ensaios efectuados de acordo com a normalização europeia;
- controle da permeabilidade global das habitações, particularmente, através das caixas de estore e portas exteriores. Quanto às portas, a baixa permeabilidade ao ar só é conseguida recorrendo, nomeadamente, a vedantes de borracha nas folgas e

soleira rebaixada. A permeabilidade ao ar da caixilharia exterior deve ser limitada de acordo com a regulamentação portuguesa e recomendações do LNEC, preferencialmente deve ser da classe 3 ou classe 4;

- as admissões de ar deverão ser localizadas de forma a minimizar o risco de desconforto. Isto significa que devem ser preferencialmente colocadas a um nível elevado (≥ 1,8 m), nomeadamente, na padieira do vão e com o jacto direccionado para a janela. Os radiadores de aquecimento ambiente devem ser posicionados junto da parede exterior, sob a janela;
- previsão de uma abertura de admissão de ar nas cozinhas, a qual deve ser dimensionada para a admissão do ar de compensação. Esta deverá ser do tipo regulável/obturável e só deverá entrar em funcionamento para os caudais de ponta/máximos (durante a confecção das refeições), de modo a não interferir com os fluxos normais da ventilação de base.

Renovações horárias e exaustão mecânica da cozinha

- as renovações horárias devem ser sempre superiores a 0,6 h^{-1}, aconselhando-se, de modo a limitar superiormente a higrometria interior, valores na ordem de 0,7 a 0,8 h^{-1}, para precaver situações de subventilação potenciadoras de problemas de qualidade do ar interior e de condensações, em face do reduzido hábito de aquecimento ambiente;
- caudal mínimo, contínuo, de exaustão na cozinha de 60 m^3/h ou 2 *RPH*. A recomendação de 2 *RPH* deriva da necessidade de garantir caudais mínimos nas cozinhas de maior dimensão;
- caudal máximo de exaustão na cozinha de 180 m^3/h, durante o período do pequeno-almoço (≈1h30m; 6h30m-8h00m) e durante o período do jantar (≈2h00m; 19h00m-21h00m). A duração e o período de funcionamento poderão ser obtidos através de análises estatísticas dos hábitos dos residentes;
- condutas das instalações sanitárias dimensionadas para um caudal nominal mínimo de 45 m^3/h ou 4 *RPH*, o que implica o uso de uma conduta com um diâmetro mínimo de ϕ125;

- admissão de ar nos compartimentos principais com um mínimo de 30 m^3/h ou 1 *RPH*;
- a exaustão nas cozinhas deve ser efectuada com um dispositivo de caudal variável, accionável pelo utilizador. O caudal variará, preferencialmente, continuamente entre o valor mínimo e máximo ou em alternativa somente com os dois valores extremos.

Passagens de ar interiores

- uma vez que, de um modo geral, se desconhece a permeabilidade das portas interiores, recomenda-se para os quartos e salas, em alternativa às folgas nas portas que muitas vezes não são implementadas com as secções necessárias, aberturas junto às portas, de mais fácil ocultação, tendo em atenção a dificuldade arquitectónica em colocar grelhas nas portas;
- em relação às portas das instalações sanitárias e cozinhas, é imprescindível equacionar-se a colocação de grelhas que assegurem a área útil necessária.

Aberturas de extracção de ar

- cada compartimento de serviço deverá apresentar, pelo menos, um dispositivo de extracção de ar. Estes dispositivos deverão ser colocados geralmente a um nível elevado. Na cozinha a abertura de extracção de ar deve naturalmente ser localizada sobre o fogão (≥ 1,8 m), enquanto as aberturas de extracção de ar das instalações sanitárias devem estar localizadas a 2,10 m, pelo menos, acima do pavimento e tão distantes quanto possível da porta de acesso a esses compartimentos, de modo a aumentar a eficácia de extracção;
- a perda de carga das grelhas de extracção não deve exceder 3 Pa, nomeadamente, nos últimos 5 pisos. No entanto, deve ser o mais baixa possível, dado ser um factor determinante no bom desempenho da conduta.

Traçado e características das condutas

- recomenda-se o uso de isolamento térmico nas tubagens individuais de extracção natural (instalação sanitária), pois este permite conservar o gradiente térmico em

toda a altura de forma a não reduzir o caudal. A colocação de uma coquilha de lã mineral, com cerca de 30 mm de espessura, é suficiente;

- é desejável colocar ventiladores estáticos na extremidade das tubagens com ventilação natural. Os ventiladores estáticos devem ser classificados segundo o coeficiente de perda de carga e o coeficiente de depressão;
- a geometria da tubagem, nomeadamente a ausência de curvas ou acessórios que possam introduzir perdas de carga, bem como a cota superior da tubagem de extracção face a obstáculos é decisiva para que não se criem pressões que possam anular o efeito da tiragem térmica;
- a concepção arquitectónica de um edifício deve procurar encontrar soluções para que as saídas das condutas se enquadrem no conceito estético desejado, mas não é aceitável a colocação de elementos que perturbem a extracção. Este problema tem de ser resolvido, não havendo procedimentos qualitativos que permitam orientar o dimensionamento arquitectónico, recorrendo ao ensaio em laboratório que permitirá validar as soluções.

7.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A extensa campanha experimental levada a cabo permite estabelecer alguns caminhos possíveis para o desenvolvimento futuro deste trabalho, tais como:

- estender a caracterização experimental a outros ensaios em laboratório, particularmente, portas interiores, caixas de estore, grelhas auto-reguláveis com membrana anti-retorno e outros módulos de funcionamento;
- elaborar um catálogo com a caracterização experimental/técnica de todos os componentes que possam incorporar um sistema misto de ventilação;
- efectuar a modelação do sistema misto de ventilação ensaiado, nomeadamente, através de estudos de sensibilidade que possibilitem aquilatar da influência da permeabilidade global das habitações, da grelha de passagem nas portas interiores, da grelha exterior de compensação e do caudal de ponta (máximo) nas renovações

horárias. Com particular relevância, será necessário estudar em que condições críticas se dão, na presença do extractor mecânico na cozinha, a inversão do fluxo nas condutas das instalações sanitárias e a paragem do aparelho tipo B;

- estudar, experimentalmente ou por modelação, as várias possibilidades de implementação da abertura de admissão de ar nas cozinhas dimensionada para a admissão do ar de compensação. Em particular, é necessário estabelecer a área mínima da grelha;
- desenvolver estudos experimentais, com recurso à técnica PFT, que permitam fazer um levantamento alargado das condições reais de ventilação dos edifícios de habitação portugueses, envolvendo outra tipologia de habitações, tais como, apartamentos com dimensões mais pequenas (T0 e T1) e maiores (T4 e T5). Estes estudos devem também alargar-se ao território nacional.

ANEXO A. TERMINOLOGIA

Conceito	Descrição
Admissão de ar:	abertura de admissão de ar exterior concebida para o efeito.
Ar novo:	ar exterior que é introduzido no edifício para alimentação dos aparelhos de combustão e para renovação do ar do local com fins de higiene e saúde.
Ar poluído (ar viciado):	ar existente num local contaminado pelos efluentes libertados pelos ocupantes, pelas suas actividades e pelos materiais da envolvente.
Cápsula emissora passiva:	dispositivo emissor de gás traçador através do processo da difusão passiva.
Cápsula receptora passiva:	dispositivo de recolha de gás traçador através do processo de adsorção passiva.
Caudal mássico/volúmico:	fluxo mássico ou volúmico de ar que passa num determinado plano dividido pelo tempo, expressa-se frequentemente em [kg/s] ou [m^3/s].
Coeficiente de descarga (ou vazão):	coeficiente adimensional que relaciona o caudal médio que atravessa uma abertura (e a correspondente área) e a diferença de pressão através da abertura.
Coeficiente de perda de carga:	factor adimensional que resulta da perda de energia mecânica de um fluxo.

Coeficiente de pressão:	coeficiente adimensional que relaciona a pressão gerada pelo escoamento nas superfícies exteriores de um corpo (neste caso de um edifício) com a pressão de estagnação do escoamento.
Compartimento de serviço:	compartimento de um fogo no qual existem zonas de lavagens, instalações sanitárias ou zonas de confecção de alimentos.
Compartimento principal:	compartimento de um fogo que constitui uma zona de estar ou de dormir. Incluem-se os quartos, escritórios, salas de estar e salas de jantar.
Depressão:	pressão induzida que se situa abaixo da pressão atmosférica ambiente ou outra pressão de referência.
Efeito de chaminé:	escoamento no interior de espaços de desenvolvimento vertical gerado por diferença de pressão entre o interior e o exterior provocada pelas diferenças de densidade do ar, tendo esta origem na diferença de temperatura entre o ar interior e o ar exterior.
Ensaio de permeabilidade ao ar:	método que permite medir a permeabilidade de um edifício ou componente através da instalação de um ventilador na envolvente, por exemplo uma "porta-ventiladora", criando uma sobrepressão/depressão estática no interior. A permeabilidade obtém-se pela medição do caudal através do ventilador e pela diferença de pressão através da envolvente.
Plano neutro:	nível em que a diferença de pressão, derivada do efeito de chaminé, entre o exterior e o interior é nula.
Exaustão de ar:	remoção de ar para o exterior (atmosfera). Pode ser todo ou apenas parte do ar de extracção.

Exfiltração:	passagem de ar incontrolada de um espaço para o exterior através de aberturas, não dedicadas à ventilação, da envolvente desse espaço (folgas/frinchas ou fendas).
Extracção de ar:	remoção de ar de um espaço.
Fluxo de ar:	movimento de ar, usualmente num espaço confinado.
Gás traçador:	gás detectável, existente em baixas concentrações na atmosfera, não tóxico e não reactivo com a envolvente, usado para determinar a taxa de renovação horária ou outros parâmetros relacionados.
Grelha auto-regulável:	dispositivo de admissão/extracção de ar que se auto-regula em função da diferença de pressão ou da diferença de humidade relativa entre o ar interior e o ar exterior, tendo por objectivo manter um caudal constante de admissão/extracção.
Grelha de passagem:	grelha que permite a passagem de ar de um espaço/local para outro espaço/local.
Grelha fixa:	dispositivo de admissão de ar que mantém fixa permanentemente a sua área livre de passagem.
Grelha regulável (manualmente):	dispositivo de admissão de ar que permite ajustar a área livre de passagem e/ou a direcção do fluxo de ar.
Idade média do ar (local):	tempo médio que o ar leva entre a admissão de ar e um determinado ponto, expressa-se frequentemente em [h].
Infiltração:	passagem de ar incontrolada do exterior para o interior através de aberturas, não dedicadas à ventilação, da envolvente desse espaço (folgas/frinchas ou fendas).
Método do gás traçador:	método usado para determinar as renovações horárias, ou caudais, de infiltração/exfiltração ou derivados do sistema de ventilação.

Pano de apanhar (“hotte”):	cúpula montada sobre os aparelhos de cozinha para captar os poluentes derivados da combustão e da cocção dos alimentos.
Perda de carga:	diferença da pressão total entre dois pontos usualmente resultante da resistência de atrito à passagem de fluxo numa conduta ou componente, expressa-se frequentemente em [Pa].
Permeabilidade ao ar:	fluxo de ar através de um componente ou envolvente de um edifício, quando se aplica a este uma diferença de pressão.
Porta-ventiladora:	dispositivo que se coloca na porta de entrada de um edifício, fogo ou compartimento, contendo um ventilador que pressuriza ou despressuriza o espaço. É normalmente usado para testar a permeabilidade da envolvente desse espaço.
Pressão de ar:	força por unidade de área que o ar exerce em qualquer superfície que contacta com ele, expressa-se frequentemente em [Pa].
Pressão devida ao vento:	diferença de pressão entre a pressão local induzida pela acção do vento no exterior de um edifício e a pressão estática medida num local que não sofra a acção do edifício ou de qualquer protecção, expressa-se frequentemente em [Pa].
Pressão dinâmica:	pressão proporcional à velocidade de um fluido num determinado ponto, expressa-se frequentemente em [Pa].
Pressão estática:	pressão total subtraída da pressão dinâmica, expressa-se frequentemente em [Pa].
Pressão interna:	pressão no interior de uma envolvente de um edifício ou

	espaço. Usualmente expressa-se em relação à pressão exterior ou pressão atmosférica, expressa-se frequentemente em [Pa].
Renovações por hora:	caudal volúmico que entra ou sai de um espaço dividido pelo respectivo volume, expressa-se frequentemente em [h^{-1}].
Renovações por hora a uma pressão de referência:	caudal volúmico dividido pelo volume do espaço derivado de uma diferença de pressão, usualmente 50 Pa, entre o exterior e o interior, expressa-se frequentemente em [h^{-1}].
Sobrepressão:	pressão induzida que se situa acima da pressão atmosférica ambiente ou outra pressão de referência.
Técnica da concentração constante:	técnica que consiste na injecção descontínua de um caudal de gás traçador que permita manter uma determinada concentração constante.
Técnica da emissão constante:	técnica que consiste na injecção contínua de um caudal constante de gás traçador de forma a obter uma concentração de equilíbrio (concentração constante) ao fim de um determinado tempo.
Técnica do declive:	técnica que consiste na injecção de uma quantidade de gás traçador e posterior registo do decaimento da concentração em função do tempo.
Técnica PFT:	técnica do método do gás traçador, denominada por PFT devido ao tipo de gás usualmente empregue (Perfluorocarbon Tracer), em que se utilizam cápsulas passivas, emissoras e receptoras.
Ventilação:	processo de renovação do ar num espaço limitado consistindo na admissão de ar novo e remoção de ar poluído.

Ventilação conjunta:	estratégia de ventilação na qual todos os compartimentos do fogo estão englobados, sendo realizada a admissão de ar pelos compartimentos principais e a exaustão pelos compartimentos de serviço.
Ventilação cruzada:	ventilação natural em que o fluxo de ar resulta maioritariamente do efeito da pressão do vento nas fachadas do edifício e em que o efeito de chaminé tem uma menor importância.
Ventilação em fachada única:	admissão e exaustão de ar através de aberturas, grelhas ou janelas, colocadas numa única fachada.
Ventilação híbrida:	processo de ventilação em que a ventilação natural pode ser, pelo menos num certo período, auxiliada ou substituída por ventilação mecânica; este processo implica a determinação automática das condições de ventilação natural para arranque da ventilação mecânica.
Ventilação mecânica:	ventilação auxiliada por componentes que fazem movimentar o fluxo de ar. Pode subdividir-se nos seguintes sistemas: insuflação mecânica; extracção mecânica localizada e individual; ventilação mecânica centralizada (VMC ou fluxo simples); ventilação mecânica de duplo fluxo (sistemas equilibrados).
Ventilação mista:	ventilação que recorre simultaneamente ao uso da ventilação mecânica e da ventilação natural.
Ventilação natural:	processo de ventilação através de aberturas na envolvente, dedicadas a esse fim ou não, que se baseia na acção do vento e no efeito de chaminé.
Ventilação separada:	estratégia de ventilação que divide o fogo em zonas ventiladas independentes.

Ventilador (aspirador) estático:	elemento terminal exterior colocado no extremo superior da conduta. Este elemento destina-se a, sob a acção do vento e independentemente da sua direcção, gerar uma situação de depressão no interior da conduta.

BIBLIOGRAFIA DO ANEXO A

A terminologia anteriormente apresentada foi retirada e adaptada da seguinte bibliografia:

[A.1] Roulet, C.; Vandaele, L., Air Flow Patterns Within Buildings. Measurement Techniques, Technical Note 34, Annex 5-AIVC, IEA-ECBCS, 1991.

[A.2] Limb, M., Air Infiltration and Ventilation Glossary, Technical Note 36, Annex 5-AIVC, IEA-ECBCS, 1992.

[A.3] CEN, Thermal Performance of Buildings. Determination of Air Permeability of Buildings. Fan Pressurization Method, EN 13 829, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2000.

[A.4] IPQ, Ventilação e Evacuação dos Produtos da Combustão dos Locais com Aparelhos a Gás. Parte 1: Edifícios de Habitação. Ventilação Natural, Instituto Português da Qualidade, NP 1037-1, Lisboa, 2002.

[A.5] CEN, Ventilation for Buildings. Symbols, Terminology and Graphical Symbols, EN 12 792, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2003.

[A.6] Decreto-Lei n.º 79/2006, Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização (RSECE), 4 de Abril, Diário da República, I Série-A, Lisboa, 2006.

[A.7] ASHRAE, Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Low-Rise Residential Buildings, Ansi/Ashrae Standard 62.2-2007, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA, 2007.

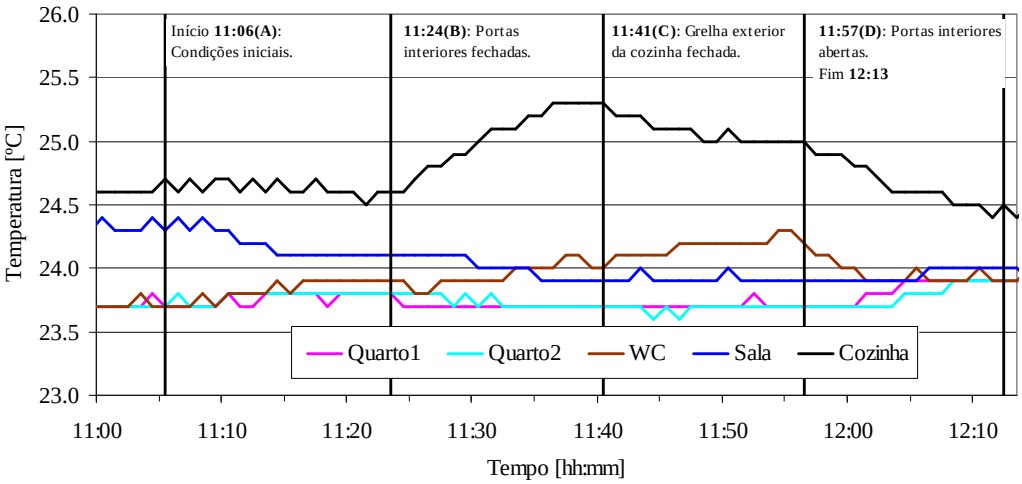
ANEXO B. CONDIÇÕES CLIMÁTICAS MEDIDAS DURANTE AS TRÊS CAMPANHAS EXPERIMENTAIS

B.1. PRIMEIRA CAMPANHA EXPERIMENTAL: VERÃO DE 2005 - APARTAMENTOS DESOCUPADOS

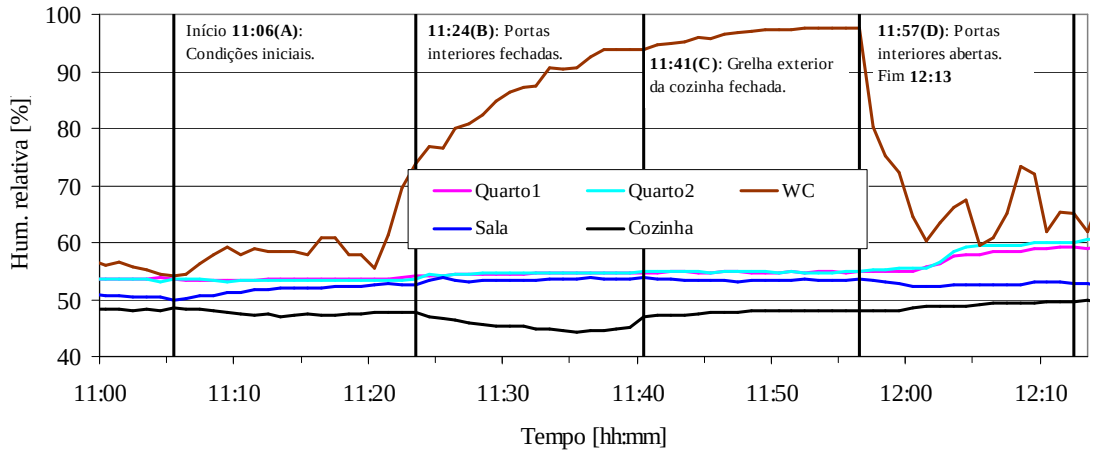
Análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica

A análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustor mecânico da cozinha realizou-se nos dias 19 e 20 de Julho de 2005.

Apresenta-se na Figura B.1 a evolução das condições interiores (temperatura e humidade relativa) para o ensaio com exaustor desactivado e esquentador activado (ventilação natural).



a) Evolução da temperatura.

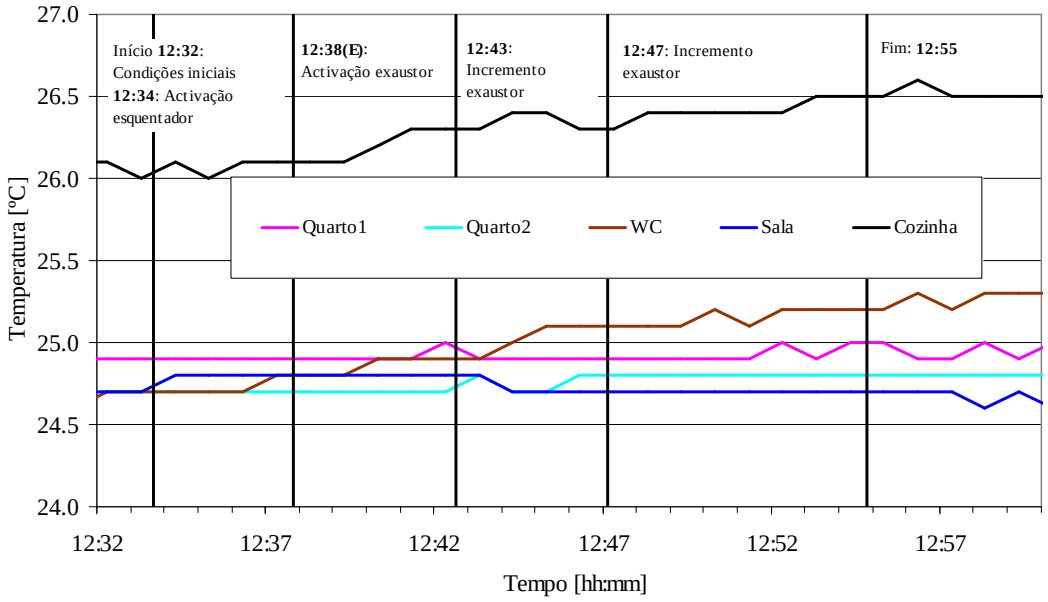


b) Evolução da humidade relativa.

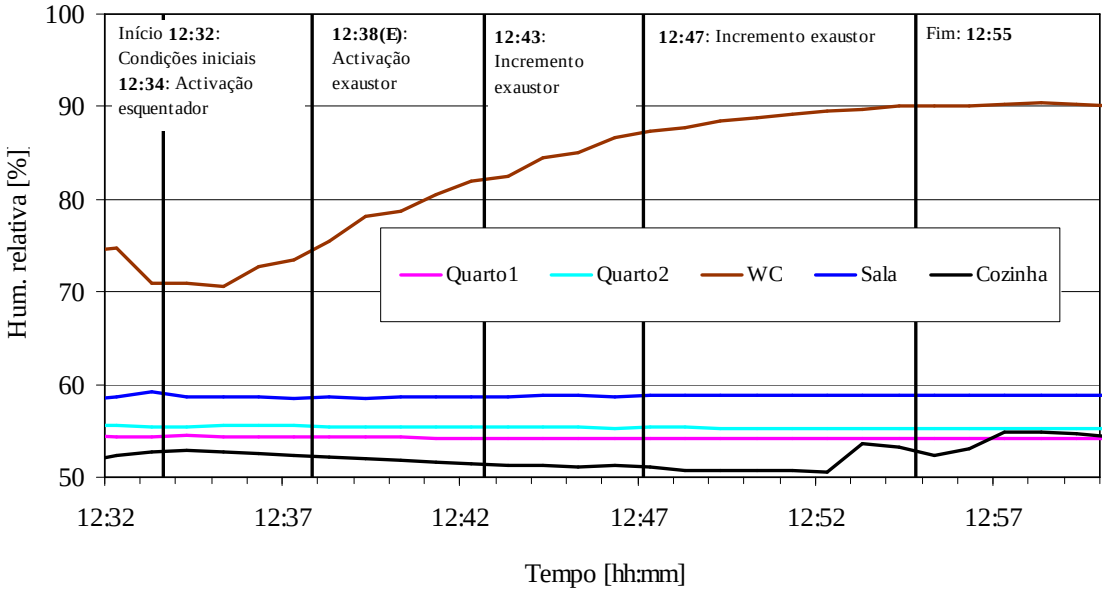
Figura B.1 - 1.ª campanha: análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica. Evolução da temperatura e humidade relativa nos ensaios com exaustor desactivado e esquentador activado (ventilação natural).

Pela análise da Figura B.1, pode-se concluir que, apesar da existência das grelhas de passagem, ao fechar-se as portas tanto a temperatura como a humidade relativa tendem a subir nos compartimentos de serviço (comportamento mais notório na temperatura). O que pode levar a concluir que o calor e o vapor de água em situação corrente (porta da instalação sanitária aberta em simultâneo com saída de água quente) se dissipam por todos os compartimentos. O fecho da grelha exterior da cozinha leva a um decréscimo ligeiro da temperatura interior no respectivo compartimento, podendo a explicação para este facto ser que o ar que alimentava o esquentador vinha do exterior. Este tinha uma temperatura média, desde o início do ensaio, de 29,3ºC, temperatura significativamente superior à temperatura inicial da cozinha.

Apresenta-se na Figura B.2 a evolução das condições interiores (temperatura e humidade relativa) para o ensaio com exaustão mecânica (tudo fechado).



a) Evolução da temperatura.

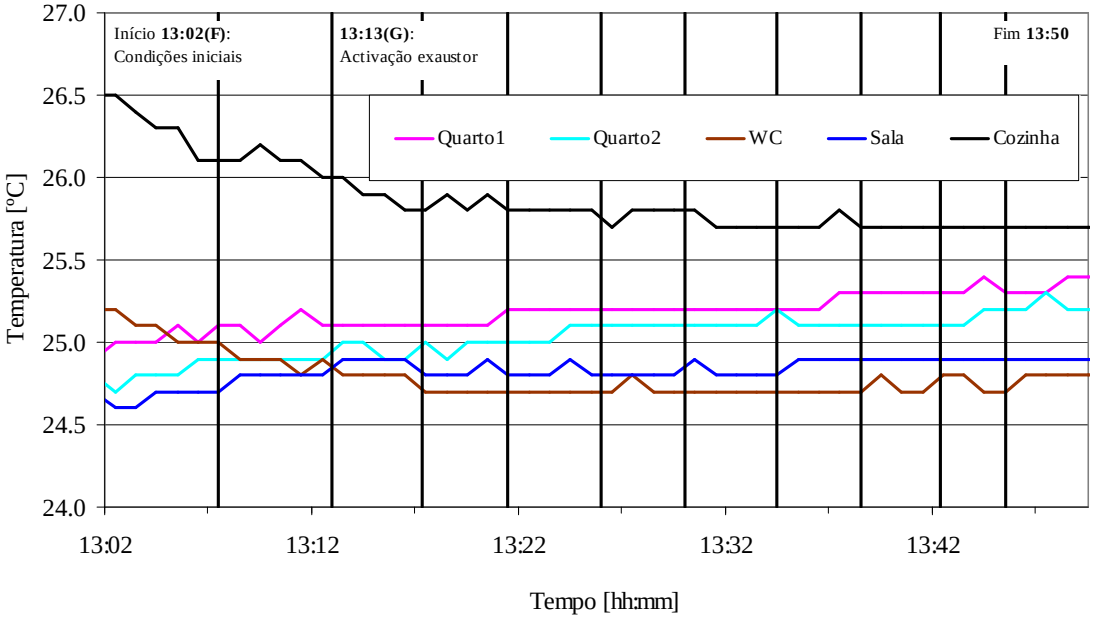


b) Evolução da humidade relativa.

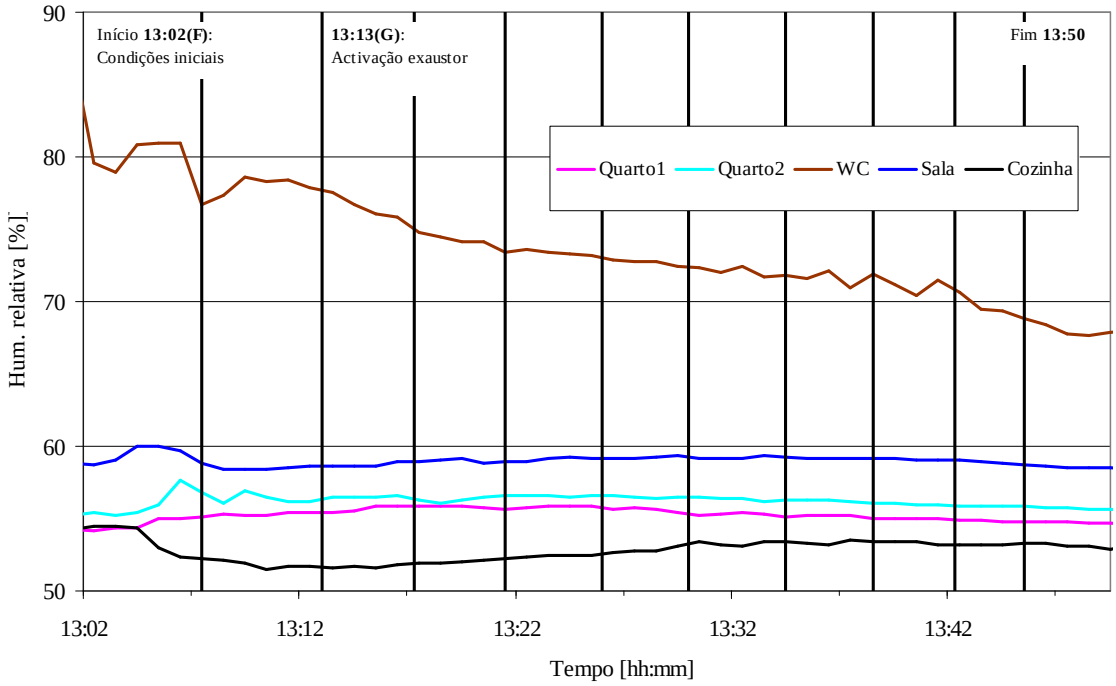
Figura B.2 - 1.ª campanha: análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica. Evolução da temperatura e humidade relativa no ensaio com exaustão mecânica (tudo fechado).

Pela análise da Figura B.2, pode-se concluir que ao fechar-se as portas e as grelhas interiores e exterior de passagem tanto a temperatura como a humidade relativa tendem a subir na instalação sanitária. Ao contrário, nos compartimentos principais, as mesmas variáveis tendem a estabilizar. Na cozinha, a temperatura tem um ligeiro acréscimo, provavelmente devido ao funcionamento do esquentador. Pode-se concluir também que, face a este ligeiro acréscimo, não há inversão do fluxo dos produtos da combustão do esquentador.

Apresenta-se na Figura B.3 a evolução das condições interiores (temperatura e humidade relativa) para o ensaio com exaustão mecânica (tudo aberto).



a) Evolução da temperatura.

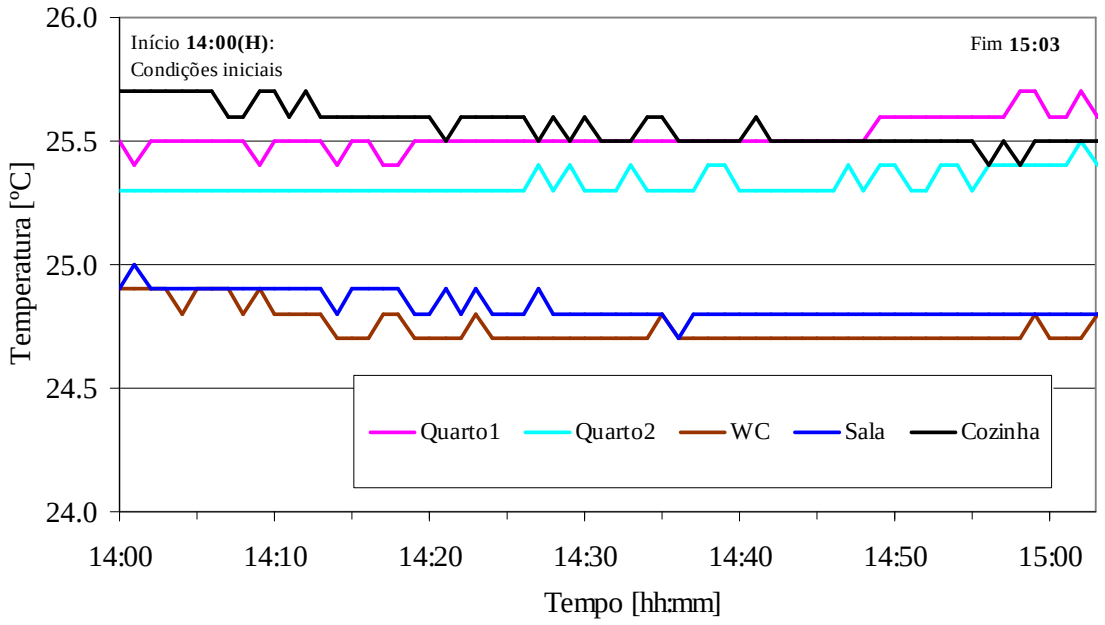


b) Evolução da humidade relativa.

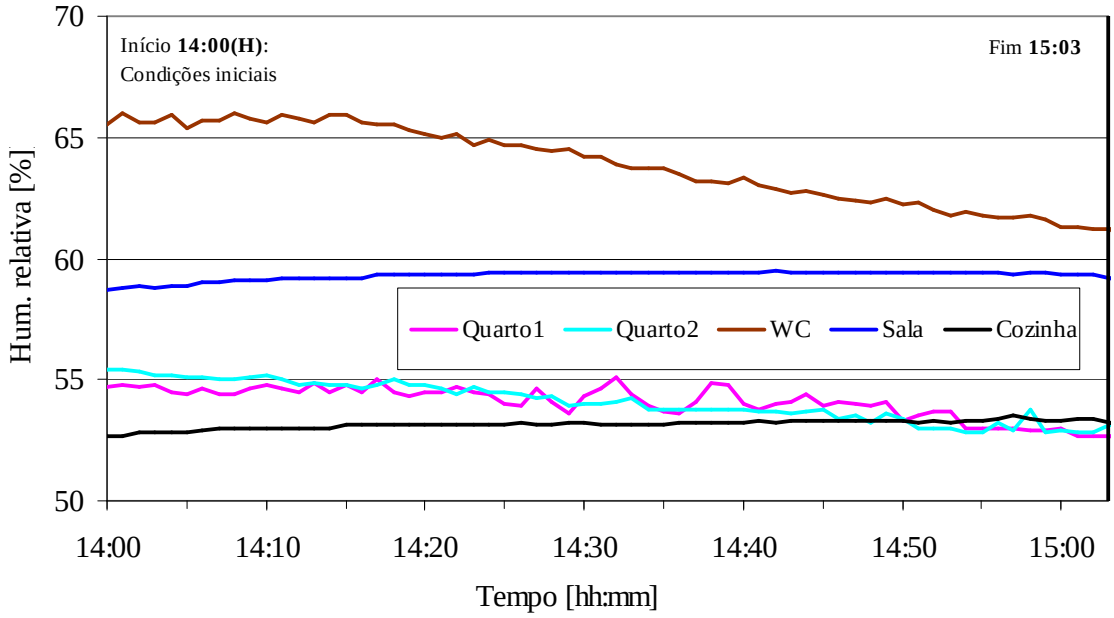
Figura B.3 - 1.ª campanha: análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica. Evolução da temperatura e humidade relativa nos ensaios com exaustão mecânica (tudo aberto).

Pela análise da Figura B.3, e à semelhança do primeiro ensaio, verifica-se que a abertura das portas favorece o decréscimo da temperatura e humidade relativa na instalação sanitária (os níveis iniciais elevados destas variáveis justificam-se pela sequência deste ensaio em relação ao anterior).

Apresenta-se na Figura B.4 a evolução das condições interiores (temperatura e humidade relativa) para o ensaio com exaustor e esquentador desactivados (ventilação natural).



a) Evolução da temperatura.



b) Evolução da humidade relativa.

Figura B.4 - 1.ª campanha: análise de sensibilidade do funcionamento do esquentador e exaustão mecânica. Evolução da temperatura e humidade relativa no ensaio com exaustor e esquentador desactivados (ventilação natural).

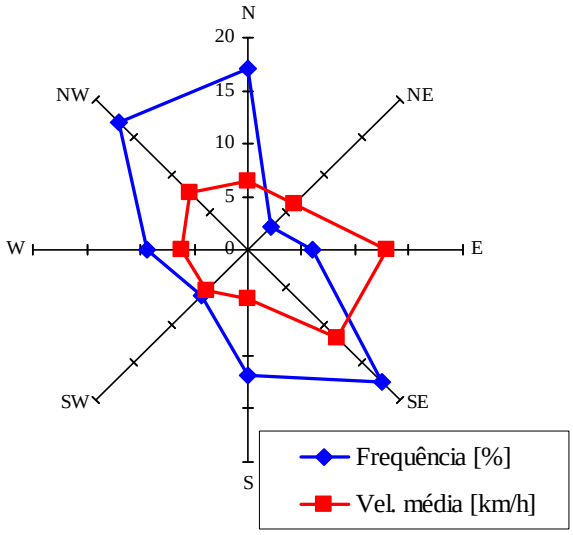
Pela análise da Figura B.4, pode-se concluir que tanto a temperatura como a humidade relativa tendem a estabilizar. Os valores ligeiramente superiores da temperatura nos quartos 1 e 2 podem justificar-se pela exposição à radiação solar durante o ensaio. O decréscimo da humidade relativa na instalação sanitária pode justificar-se pela sequência deste ensaio em relação ao anterior. No entanto, à semelhança do primeiro ensaio, pode concluir-se que em situação corrente, portas abertas, os valores da humidade relativa e temperatura tendem a uniformizar-se.

Renovações horárias

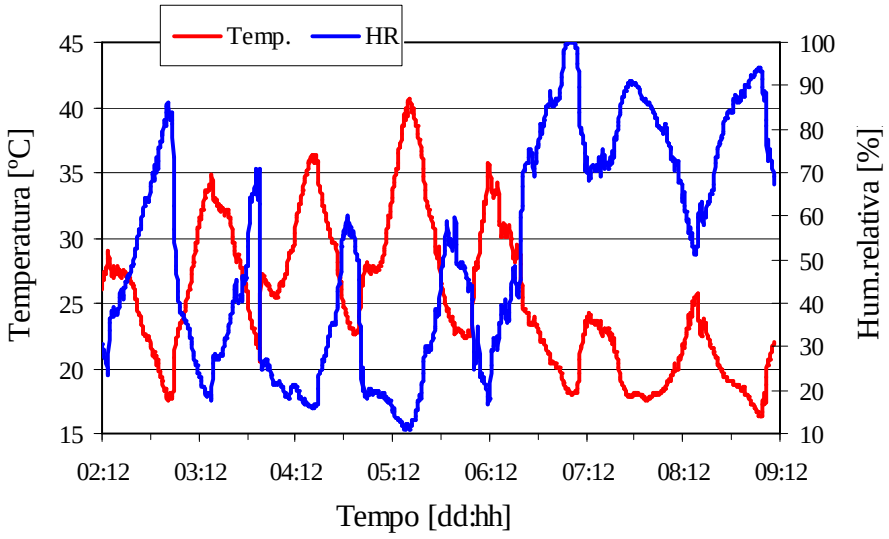
A determinação das renovações horárias decorreu entre os dias 2 e 9 de Agosto de 2005. As condições de registo das variáveis foram as seguintes:

- temperatura e humidade relativa exteriores: registos espaçados de dez minutos;
- velocidade e direcção do vento: médias de dez minutos de registos espaçados de dez segundos;
- temperatura e humidade relativa interiores (registo em ponto central do apartamento - ensaio PFT): médias de uma hora de registos espaçados de seis minutos.

Apresentam-se na Figura B.5 as respectivas condições climáticas exteriores.



a) Frequência da direcção e velocidade média do vento por octante.



b) Temperatura e humidade relativa.

Figura B.5 - 1.ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica PFT. Condições climáticas exteriores.

Quanto aos valores médios e extremos registados durante o período de ensaio estes foram os seguintes:

- temperatura: média = 25,4ºC, máxima = 40,6ºC e mínima = 16,3ºC;
- humidade relativa: média = 52,2%, máxima = 100% e mínima = 10,8%;
- velocidade do vento: média = 1,9 m/s, máxima = 15,7 m/s e mínima = 0,1 m/s;

Na Figura B.6 apresentam-se os resultados correspondentes à média das condições climáticas no interior.

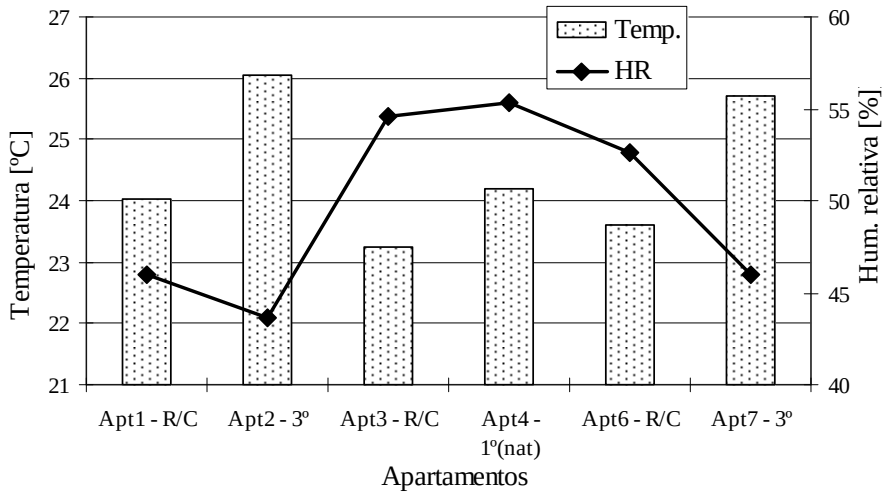


Figura B.6 - 1.ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica PFT. Média da temperatura e humidade relativa nos apartamentos.

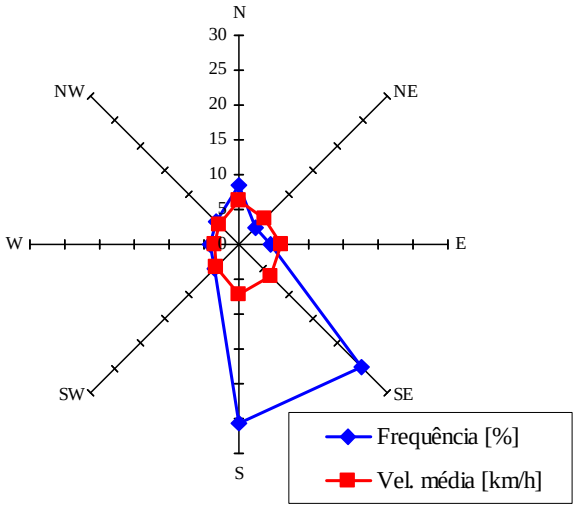
As condições atmosféricas exteriores caracterizaram-se por velocidades do vento reduzidas (médias por rumo entre 1,3 m/s a 3,6 m/s), rumos predominantemente perpendiculares aos apartamentos 3 a 5, ou seja nos octantes NW (essencialmente nos períodos da tarde e noite), e SE (essencialmente no período da manhã) e temperaturas elevadas (Figura B.5). Relativamente às condições higrotérmicas interiores, a análise da Figura B.6 indica-nos que, como era expectável, os apartamentos com temperaturas médias extremas são aqueles que estão situados no R/C e sob a cobertura, com uma diferença média de 3ºC. Não foi possível obter valores respeitantes ao apartamento 5. Relativamente à humidade relativa detecta-se um ligeiro decréscimo nos apartamentos 1, 2 e 7, os mais expostos à radiação solar durante a tarde.

B.2. SEGUNDA CAMPANHA EXPERIMENTAL: SEMANA DE 12 A 19 DE JANEIRO DE 2006 - APARTAMENTOS DESOCUPADOS

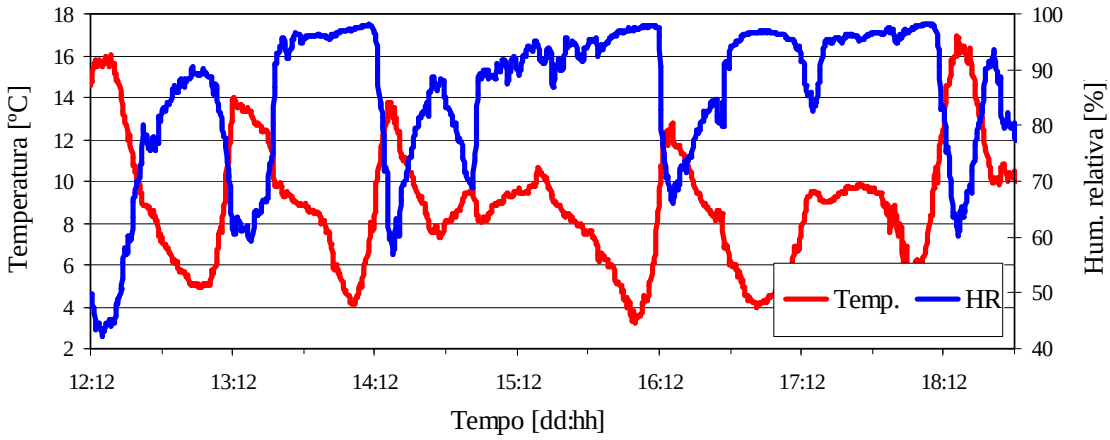
Apresentam-se somente as condições climáticas ocorridas na semana da segunda campanha em que decorreu a determinação das renovações horárias apresentadas no §6,

semana de 12 a 19 de Janeiro de 2006 (semana 2). As condições de registo das variáveis não sofreram alterações em relação à campanha anterior.

Apresentam-se na Figura B.7 as respectivas condições climáticas exteriores.



a) Frequência da direcção e velocidade média do vento por octante.



b) Temperatura e humidade relativa.

Figura B.7 - 2.ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica PFT (semana 2). Condições climáticas exteriores.

Quanto aos valores médios e extremos registados durante o período de ensaio estes foram os seguintes:

- temperatura: média = 8,8ºC, máxima = 16,9ºC e mínima = 3,2ºC;
- humidade relativa: média = 85,7%, máxima = 98,3% e mínima = 44,6%;
- velocidade do vento: média = 1,4 m/s, máxima = 11,9 m/s e mínima = 0,0 m/s.

Na Figura B.8 apresentam-se os resultados correspondentes à média das condições climáticas no interior.

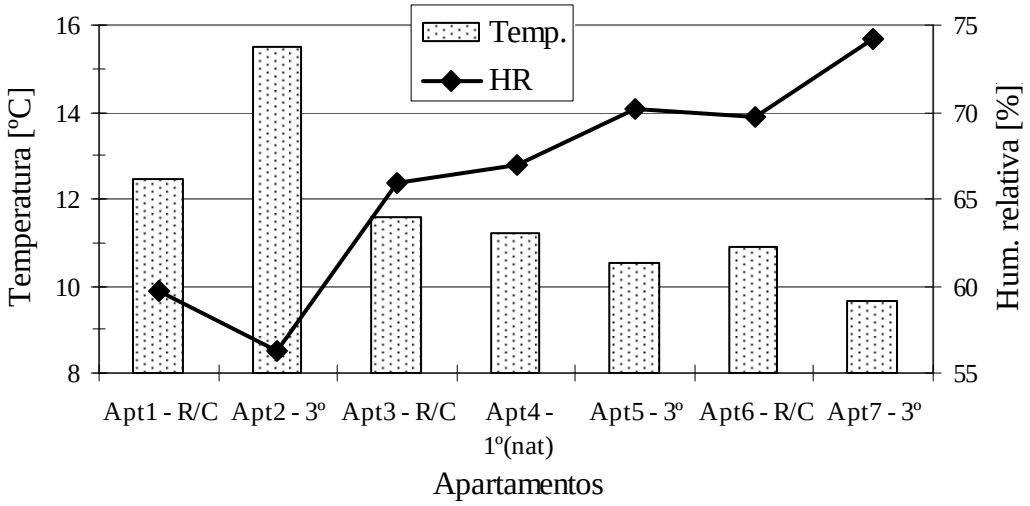


Figura B.8 - 2.ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica PFT (semana 2). Média da temperatura e humidade relativa nos apartamentos.

As condições atmosféricas exteriores caracterizaram-se por velocidades do vento reduzidas (médias por rumo entre 1,0 m/s a 2,0 m/s), rumos predominantemente perpendiculares aos apartamentos 3 a 5, ou seja nos octantes S e SE, e temperaturas baixas (Figura B.7). Relativamente às condições higrotérmicas interiores, a análise da Figura B.8 indica-nos que, como era expectável, os apartamentos têm temperaturas médias bastante baixas, independentemente da localização, à excepção do apartamento 2 que foi aquecido. Relativamente à humidade relativa esta encontra-se dentro de valores razoáveis.

B.3. TERCEIRA CAMPANHA EXPERIMENTAL: JANEIRO DE 2007 - APARTAMENTOS OCUPADOS

Estes ensaios decorreram no mês de Janeiro de 2007 (semana de 13 a 20). Devido a dificuldades experimentais, a velocidade e direcção do vento foi obtida na estação meteorológica da Serra do Pilar, com quatro registos diários espaçados de três horas.

Apresentam-se na Figura B.9 as respectivas condições climáticas exteriores.

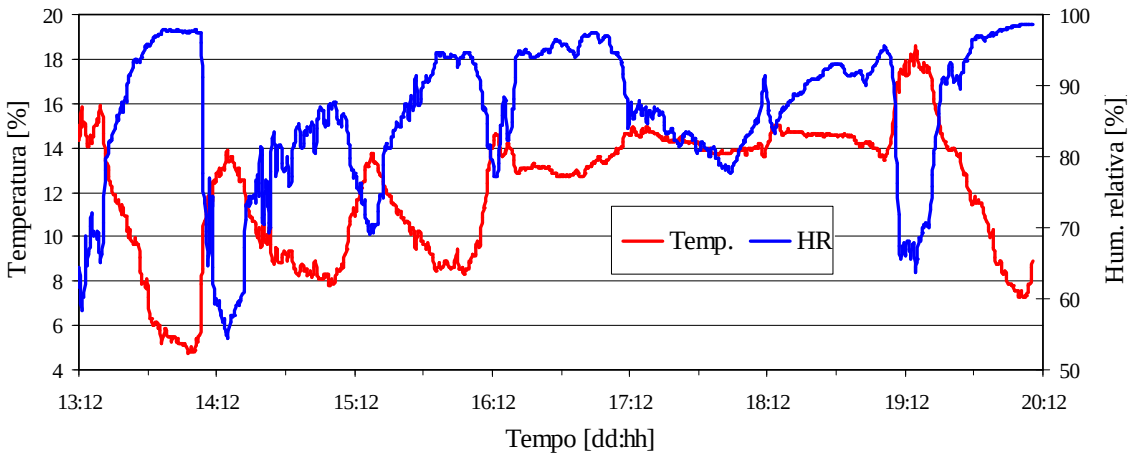


Figura B.9 - 3.ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica PFT. Temperatura e humidade relativa exteriores.

Quanto aos valores médios e extremos registados durante o período de ensaio, estes foram os seguintes:

- temperatura: média = 12,1ºC, máxima = 18,6ºC e mínima = 4,7ºC;
- humidade relativa: média = 86,0%, máxima = 98,6% e mínima = 54,4%;
- velocidade do vento: média = 3,5 m/s, máxima = 6,9 m/s e mínima = 0,8 m/s.

Na Figura B.10 apresentam-se os resultados correspondentes à média das condições climáticas no interior.

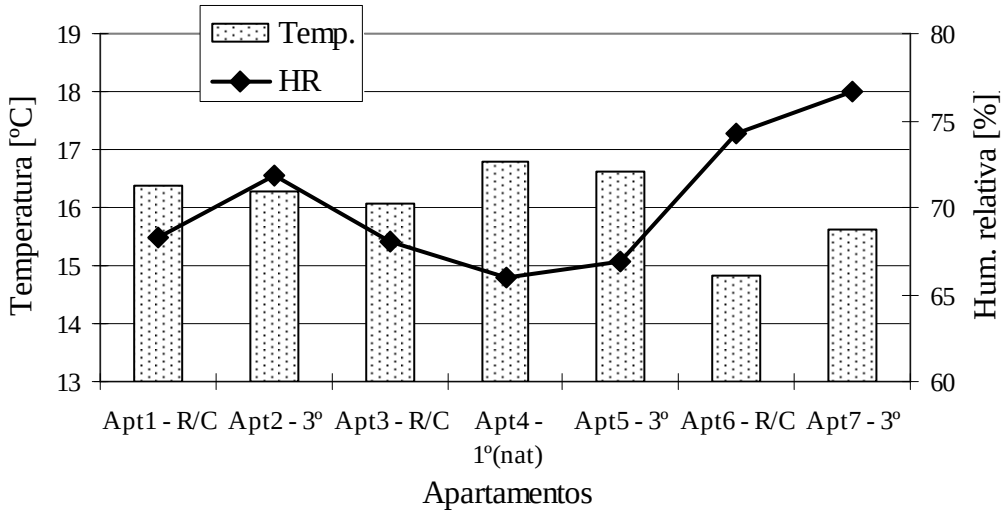


Figura B.10 - 3.ª campanha: determinação das renovações horárias pela técnica PFT. Média da temperatura e humidade relativa nos apartamentos.

As condições atmosféricas exteriores caracterizaram-se por velocidades do vento razoáveis e temperaturas baixas (Figura B.9). A direcção do vento, segundo os dados apresentados em §6.3.1.5., presume-se que teve como rumo predominante o octante Este. Relativamente às condições higrotérmicas interiores, a análise da Figura B.10 indica-nos que os apartamentos têm temperaturas médias baixas e homogéneas entre eles, à excepção dos apartamentos 6 e 7, orientados a SW/NE, com médias ligeiramente inferiores. Este último apartamento também registou, na 2.ª campanha (Inverno), uma das temperaturas médias mais baixa, o que pode ser explicado pela sua localização, sob a cobertura, e orientação (situação inversa registou-se na 1.ª campanha - Verão). A baixa temperatura do apartamento 6 pode ser explicada pelo tipo de ocupantes (2 adultos e 1 idoso com aparentes capacidades económicas inferiores aos restantes habitantes). Relativamente à humidade relativa esta encontra-se dentro de valores razoáveis.

ANEXO C. CARACTERÍSTICAS DOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS

Neste anexo sumarizam-se as características da instrumentação usada *in situ*, excepto para os dispositivos do ensaio PFT que já se encontram descrito no §4 desta tese. A terminologia usada consta do documento: "IPQ, Vocabulário Internacional de Metrologia, 3.ª edição, Dezembro de 2005".

Quadro C.1 - Características das sondas de temperatura e humidade relativa.

Características	Grandeza: Temperatura	Grandeza: Humidade relativa
Fabricante:	Rotronic (Ref.: Higroclip S)	Rotronic (Ref.: Higroclip S)
Tipo de sensor:	Resistência de platina Pt 100	Sensor capacitivo
Gama de medição:	-40 a 85ºC	0 a 100% HR
Exactidão (a 23ºC):	± 0,3ºC	± 1% HR[(a)]
Tempo de reposta:	< 0,7 s	< 0,7 s
Nota: - a: com certificado SCS.		

Quadro C.2 - Características das sondas de velocidade e direcção do vento.

Características	Grandeza: Velocidade do vento	Grandeza: Direcção do vento
Fabricante:	Young	Young
Tipo de sensor:	Anemómetro de pás	Catavento potenciométrico
Gama de medição:	0 a 50 m/s	0 a 360º
Exactidão:	± 2%	± 5%

Quadro C.3 - Características das sondas usadas nos ensaios de determinação dos índices *PMV* e *PPD*.

Características	Grandeza: Temperatura do ar	Grandeza: Humidade relativa
Fabricante:	Brüel & Kjær (Ref.: MM0034)	Brüel & Kjær (Ref.: MM0037)
Tipo de sensor:	Resistência de platina Pt 100	Transdutor de ponto de orvalho
Gama de medição:	-20 a 50ºC	Temp. do ar (T_{ar}) – Temp. ponto de orvalho (T_{po}) < 25ºC
Exactidão:	± 0,5ºC (-20 a 50ºC) ± 0,2ºC (5 a 40ºC)	$T_{ar} - T_{po}$ < 10ºC: ± 0,5ºC 10ºC < $T_{ar} - T_{po}$ < 25ºC: ± 1,0ºC
Tempo de resposta:	20 s (50%) 50 s (90%)	1 minuto

Quadro C.3 - Características das sondas usadas nos ensaios de determinação dos índices *PMV* e *PPD* (continuação).

Características	Grandeza: Velocidade do ar	Grandeza: Temperatura operativa
Fabricante:	Brüel & Kjær (Ref.: MM0038)	Brüel & Kjær (Ref.: MM0060)
Tipo de sensor:	Anemómetro de elipsóide omnidireccional	-
Gama de medição:	0,05 a 1 m/s	-20 a 50ºC
Exactidão:	± 5%·V ± 0,05 m/s	± 0,3ºC (5 a 40ºC) ± 0,5ºC (-20 a 50ºC)
Tempo de resposta:	0,2 s (90%)	1 minuto (50%) 10 minutos (90%)

Quadro C.3 - Características das sondas usadas nos ensaios de determinação dos índices *PMV* e *PPD* (continuação).

Características	Grandeza: Temp. média radiante
Fabricante:	Brüel & Kjær (Ref.: MM0036)
Gama de medição:	T_{ar} ± 50ºC
Exactidão:	± 0,5ºC
Tempo de resposta:	15 s (50%) 60 s (90%)

Quadro C.4 - Características dos anemómetros usados na determinação da velocidade em condutas.

Características	Descrição: Termoanemómetro	Descrição: Anemómetro de turbina
Fabricante:	Airflow (Ref.: TA5)	Ahlborn (Ref.: 643 a73-1)
Gama de medição da velocidade:	0 a 2 m/s; 0 a 15 m/s; 0 a 30 m/s	0,3 a 20 m/s
Exactidão da velocidade:	± 2% do fundo de escala	± 1,5% da leitura
Resolução:	0,01 m/s	0,01 m/s
Saída em tensão[(a)]:	0 a 1 V	
Exactidão da saída em tensão:	± 1% do fundo de escala	
Nota: - a: saída analógica para sistema de aquisição de dados.		

Quadro C.5 - Características dos termopares usados na determinação da temperatura nas condutas e temperaturas superficiais.

Características	Grandeza: Temperatura	Grandeza: Temperatura
Tipo de sensor:	Tipo T	Tipo J
Gama de medição:	-40 a 350ºC	0 a 750ºC
Exactidão (classe 1):	± 0,5ºC ou 0,4%·Temperatura	± 1,5ºC ou 0,4%·Temperatura
Constituição:	Cobre-Constantan (cobre-níquel), revestido a PTFE	Ferro-Constantan (cobre-níquel), revestido a fibra de vidro

Quadro C.6 - Características dos sensores de medição de CO_2 e CO.

Características	Grandeza: concentração de CO_2	Grandeza: concentração de CO
Fabricante:	Fluke (Ref.: 975V)	Fluke (Ref.: 975V)
Tipo de sensor:	Espectroscopia de infra-vermelhos não dispersiva	Espectroscopia de infra-vermelhos não dispersiva
Gama de medição:	0 - 5000 ppm	0 - 500 ppm
Exactidão:	2,75% + 75 ppm	5% ou ±3 ppm
Resolução do display:	1 ppm	1 ppm

Quadro C.7 - Características dos sensores utilizados no ensaio do gás traçador, técnica do declive.

Características	Grandeza: concentração de SF_6
Fabricante:	Innova (Ref.: 1312)
Tipo de sensor:	Espectroscopia fotoacústica de radiação infravermelha
Gama de medição[(a)]:	0,006 - 60 ppm
Tempo de resposta:	15 s (para um gás)
Repetibilidade:	1% do valor medido

Nota:
- a: é recomendável usar uma concentração máxima de 104 vezes a concentração mínima detectável (de forma a termos uma resposta linear do equipamento).

Quadro C.8 - Características da porta ventiladora usada nos ensaios de permeabilidade.

Características	Grandeza: concentração de SF_6
Fabricante:	Minneapolis Blower Door (Ref.: #A0292)
Tipo de sensor:	Caudal obtido por diferença de pressão (dispositivo tipo bocal)
Gama de medição[(a)]:	Δp = 60 Pa; 70 a 10000 m^3/h
Exactidão[(a)]:	±5%

Nota:
- a: dados obtidos em "Roulet, C.; Vandaele, L., Air Flow Patterns Within Buildings. Measurement Techniques, Technical Note 34, Annex 5-AIVC, IEA-ECBCS, 1991".

Quadro C.9 - Características dos sistemas de aquisição de dados.

Características	Descrição	Descrição
Fabricante:	Technetics (Ref.: Mikromec logger MLM1624N)[(a), (b)]	Delta-T devices (Ref.: Delta-T Logger, DL2)[(c)]
N.º de canais analógicos:	16	60 (máximo)
Intervalo de registo:	Programável (desde 2 s a 24 h)	Programável (desde 1 s a 24 h)
Leitura de tensão[(d)]:	15 bites	12 bites + sinal
Resolução analógica (conversor A/D):	0,001 (0-1,25V)	64 µV (escala de 0-262 mV)
Exactidão da leitura de termopares tipo T:	± 0,3ºC (-200 a 400ºC, resolução de 0,1ºC)	
Exactidão da leitura de tensão:		± 0,04% (15 a 25ºC)
Memória:	128 Kbytes	8 a 64 Kbytes

Notas:
- a: foram também usados mais 2 equipamentos semelhantes, diferindo somente no n.º de canais e memória disponível;
- b: usado para registo de leituras de termopares, anemómetros (tensão) e sondas de humidade e temperatura (tensão);
- c: usado para registo de leituras de termopares e anemómetros (tensão);
- d: leitura, por exemplo, de tensão provinda de anemómetros.

Quadro C.9 - Características dos sistemas de aquisição de dados (continuação).

Características	Descrição
Fabricante:	Rotronic (Ref.: Hygrolog D)[a]
N.º de canais analógicos:	2
Intervalo de registo:	Programável (desde 15 s a 120 min)
Resolução analógica (conversor A/D):	12 bites
Memória:	10 Kbytes
Nota: - a: usado para registo de 1 sonda de humidade e temperatura.	

Quadro C.9 - Características dos sistemas de aquisição de dados (continuação).

Características	Descrição
Fabricante:	Brüel & Kjær (Ref.: 1213)[a]
Intervalo de registo:	1, 6 24 ou 120 horas
Memória:	60 valores de cada parâmetro pré-seleccionado
Display:	20 caracteres alfanuméricos
Nota: - a: usado para determinar os índices *PMV* e *PPD*.	

ANEXO D. CALIBRAÇÕES

D.1. CALIBRAÇÃO DOS ANEMÓMETROS

A calibração dos anemómetros, à semelhança da determinação dos coeficientes de depressão do ventilador estático, foi efectuada num dos túneis aerodinâmicos do LNEC, para a gama de velocidades entre 0,80 m/s e 3,5 m/s. Trata-se de um túnel em circuito fechado cuja velocidade é continuamente regulável até 50 m/s. As dimensões da secção de trabalho são aproximadamente de $1{,}25\times1{,}0\times3{,}0\ m^3$ (para outros detalhes, pode-se consultar: ”Viegas, J., Segurança Contra Incêndios em Edifícios. Modelação Experimental de Incêndios e Validação Experimental, Tese de Doutoramento Submetida ao IST, Lisboa, 1999”).

A velocidade do ar foi determinada indirectamente através da medição da pressão dinâmica por um micromanómetro de precisão van Essen, tipo Betz, ligado a um tubo de Pitot-Prandtl de 5 mm de diâmetro. As sondas dos anemómetros a calibrar foram posicionadas individualmente na mesma secção do túnel em que se encontrava o tubo de Pitot a uma distância tal que não houvesse interferência mútua nas medições. Nestas condições, a calibração era realizada através da comparação directa das leituras realizadas através dos dois instrumentos (para outros detalhes, pode-se consultar: “Silva, F., Caracterização da Distribuição de Pressões na Envolvente de um Conjunto de Edifícios Situados em Gondomar, Nota Técnica 1/2007-NOE-A, LNEC, 2007”).

Foi implementada toda a cadeia de medição (ex.: anemómetros, conversores de sinal, cabos e sistema de aquisição de dados). Assim, as velocidades medidas através do tubo de Pitot (sendo registadas em termos de pressão) foram relacionadas directamente com o sinal em termos de voltagem que era medido através do sistema de aquisição de dados.

Para as velocidades compreendidas entre 0,08 m/s e 0,45 m/s as calibrações foram realizadas num túnel de vento funcionando em depressão baseado numa contracção cuja relação entre a secção de entrada e a secção de saída é de 9,0091. A velocidade do ar foi medida por um tubo de Pitot colocado a meio da secção de saída e os anemómetros a calibrar eram colocados na secção de entrada da contracção, também sensivelmente a meio. No intervalo de valores de velocidade de calibração, a incerteza global da medição é inferior a ± 0,009 m/s. A constituição e funcionamento deste túnel de vento estão descritas no relatório "Viegas, J., Equipamento para Calibração de Anemómetros de Baixa Velocidade, LNEC, NCCp, Relatório 49/00, 2000".

Apresentam-se seguidamente as curvas de calibração obtidas para alguns anemómetros utilizados. Os termoanemómetros foram unicamente utilizados na escala que permitia maior gama de medição, pelo que apenas se indicam os resultados de calibração para essa escala (até 15 m/s). O anemómetro de pás foi calibrado somente no túnel de circuito fechado.

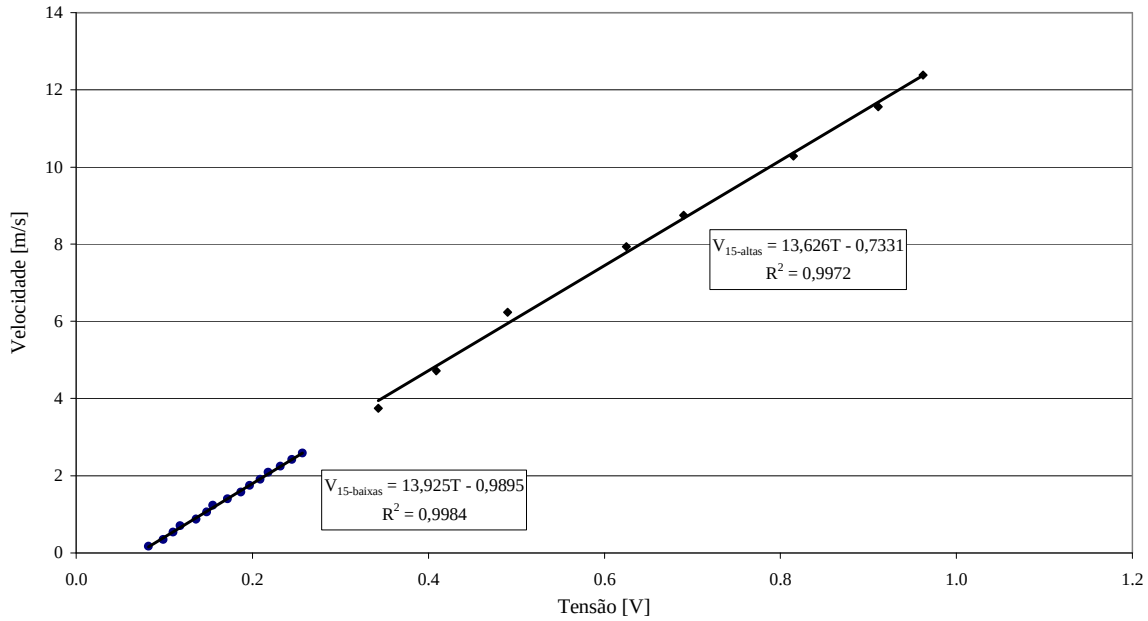


Figura D.1 - Exemplo de calibração de termoanemómetro.

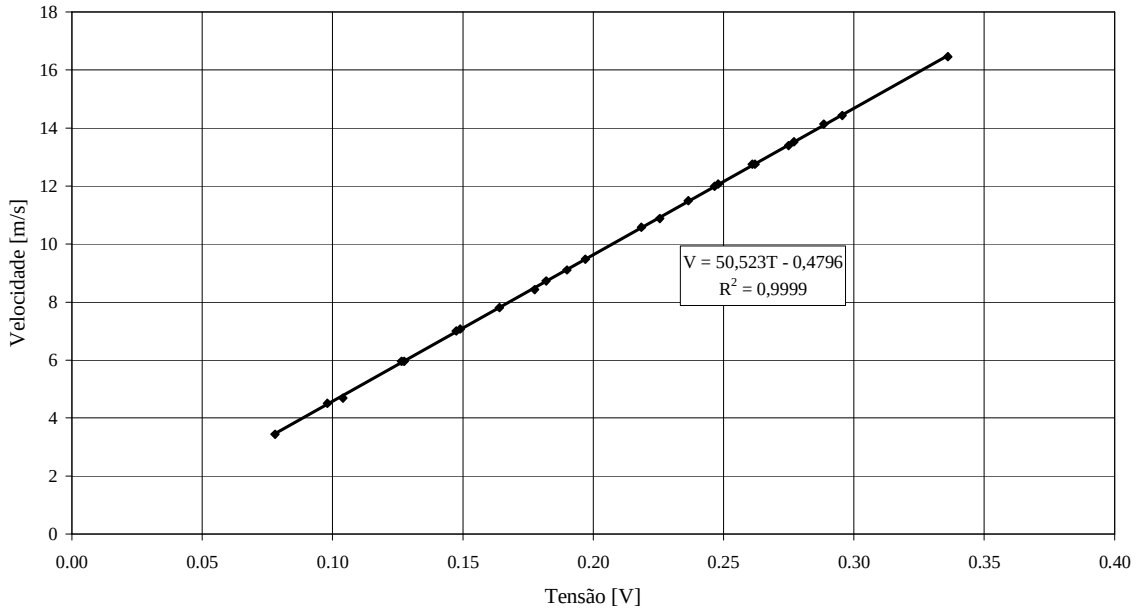


Figura D.2 - Calibração do anemómetro de pás.

D.2. CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES E DAS SONDAS DE HUMIDADE RELATIVA E TEMPERATURA

A calibração dos termopares e das sondas de humidade relativa e temperatura foi efectuada numa câmara condicionada (Aralab - Fitoclima 1000 EDTU) pertencente ao Laboratório de Ensaio de Plásticos Celulares (LEPC), do Núcleo de Revestimentos e Isolamentos (NRI) - Departamento de Edifícios (DED). A gama de medição desta câmara situa-se entre -50 a 180ºC e 10%HR a 98%HR. Foi implementada toda a cadeia de medição (sondas, cabos e sistema de aquisição de dados). Segundo o Boletim n.º 264/2005, do Centro de Instrumentação Científica - Laboratório Central de Apoio Metrológico (LNEC), esta câmara foi calibrada com padrões com uma incerteza de medição da temperatura igual a ± 0,07ºC e uma incerteza de medição da humidade relativa igual a ± 0,9%.

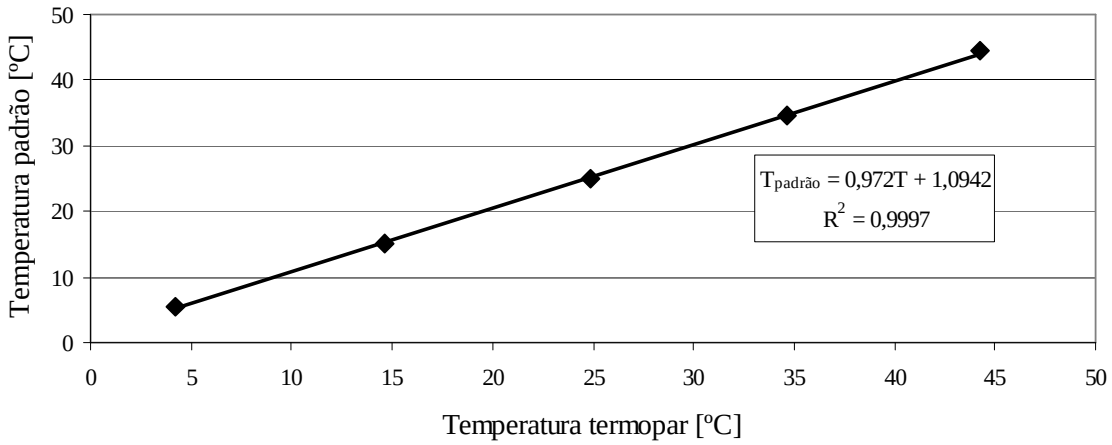


Figura D.3 - Exemplo de calibração de um termopar.

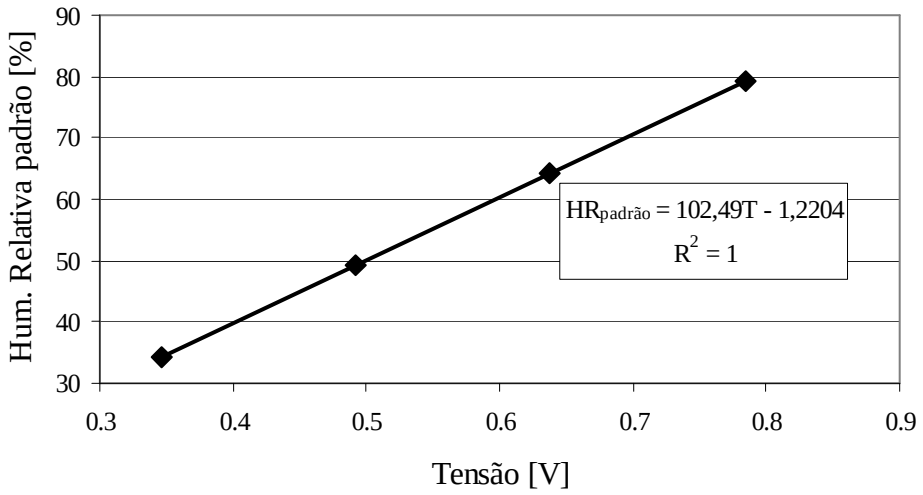


Figura D.4 - Exemplo de calibração de uma sonda de humidade relativa.

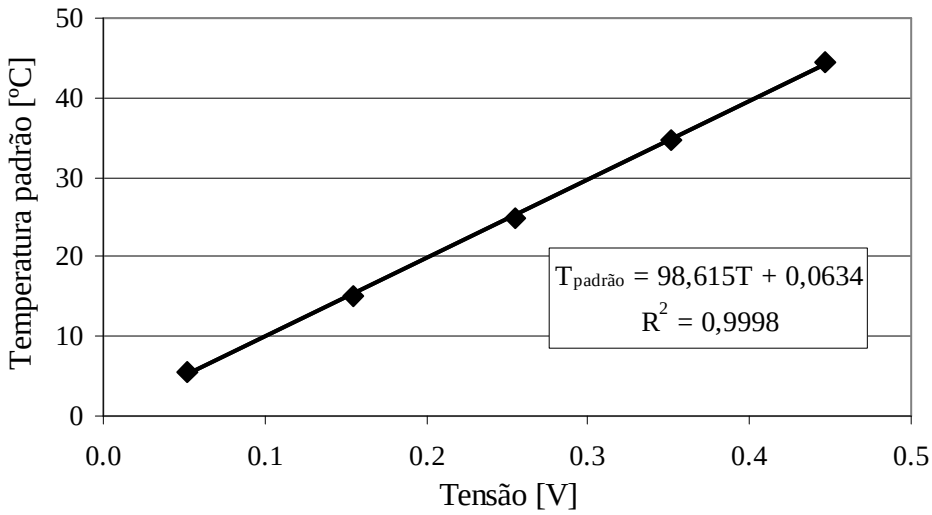


Figura D.5 - Exemplo de calibração de uma sonda de temperatura.