



**ISEL**

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia Civil**

**CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DA  
PERMEABILIDADE AO AR DA ENVOLVENTE E DO SISTEMA  
DE VENTILAÇÃO DE UM EDIFÍCIO “GAIOLEIRO”**

**FILIPE JOÃO PEREIRA DA SILVA**

Licenciado em Engenharia Civil pelo Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil  
na Área de Especialização de Edificações

**Orientador:** Doutor Armando Teófilo dos Santos Pinto (LNEC)

**Co-orientador:** Licenciada Maria Alexandra Cardoso da Costa (ISEL)

**Júri**

**Presidente:** Doutora Maria da Graça Alfaro Lopes (ISEL)

**Vogais:** Doutora Maria Helena Póvoas Corvacho (FEUP)

Doutor Armando Teófilo dos Santos Pinto (LNEC)

Licenciada Maria Alexandra Cardoso da Costa (ISEL)

Dezembro de 2011





**ISEL**

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia Civil**

**CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DA  
PERMEABILIDADE AO AR DA ENVOLVENTE E DO SISTEMA DE  
VENTILAÇÃO DE UM EDIFÍCIO “GAIOLEIRO”**

**FILIPE JOÃO PEREIRA DA SILVA**

Licenciado em Engenharia Civil pelo Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil  
na Área de Especialização de Edificações

Orientador: Doutor Armando Teófilo dos Santos Pinto (LNEC)  
Co-orientador: Licenciada Maria Alexandra Cardoso da Costa (ISEL)

**Júri**

Presidente: Doutora Maria da Graça Alfaro Lopes (ISEL)  
Vogais: Doutora Maria Helena Póvoas Corvacho (FEUP)  
Doutor Armando Teófilo dos Santos Pinto (LNEC)  
Licenciada Maria Alexandra Cardoso da Costa (ISEL)

Dezembro de 2011



## RESUMO

Os edifícios do tipo “Gaioleiro”, em continuidade com os edifícios do tipo Pombalino, são um conjunto arquitectónico e cultural de elevada importância, expressivo na cidade de Lisboa, sendo fundamental a sua conservação e reabilitação para responder a algumas das actuais preocupações relacionadas com a segurança (funcional, estrutural e construtiva), eficiência energética e valorização deste edificado.

A conservação de energia e a actual regulamentação de eficiência energética nos edifícios de habitação, baseada nos princípios da Directiva Europeia relativa ao Desempenho Energético de Edifícios 2002/91/EC (EPBD - *Energy Performance of Buildings Directive*), aplicam-se a edifícios novos e a grandes reabilitações. Contudo, a conservação de energia é uma preocupação transversal (ambiental, económica e social) e nas últimas décadas tem sido objecto de investigação. No entanto, a caracterização experimental de sistemas de ventilação e a sua influência no desempenho térmico de edifícios é escassa, não se conhecendo trabalhos em edifícios “Gaioleiros”. Para a correcta avaliação da eficiência energética das soluções de reabilitação a implementar nestes edifícios é essencial o estudo adequado do seu sistema de ventilação natural.

A presente dissertação pretende caracterizar experimentalmente o sistema de ventilação de um edifício “Gaioleiro” através de ensaios de pressurização e de gás traçador. Os ensaios de pressurização destinam-se a avaliar a permeabilidade ao ar das componentes que integram a envolvente, e assim, suportar a estimativa da taxa de infiltrações de ar. Os ensaios com gases traçadores destinam-se a medir a taxa média de renovação de ar, tendo sido, neste trabalho, avaliadas as taxas de renovação de ar para a condição actual, para uma condição de melhoria da permeabilidade ao ar da envolvente e para a condição de também ser aplicado um exaustor na chaminé. Esta avaliação experimental permitiu suportar o desenvolvimento e validação do modelo numérico de simulação da ventilação. Com este modelo validado são estimadas as taxas médias de ventilação e são estudadas oportunidades de melhoria de acordo com as exigências de qualidade do ar interior e de eficiência energética, como contributo para uma construção (reabilitação) sustentável.

Do trabalho experimental foi evidenciado que se for exclusivamente melhorada a permeabilidade ao ar da envolvente existe um elevado risco da taxa de ventilação ser insuficiente, apesar de no Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) serem previstas taxas de renovação mais elevadas para essa nova situação. Conclui-se que a caixilharia é o elemento que mais contribui para a permeabilidade ao ar da envolvente (60%). A permeabilidade ao ar deste edifício é muito elevada, sendo possível melhorar substancialmente (reduzir em 50% as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento) através de intervenções ao nível das janelas e das grelhas de admissão de ar.

*Palavras-chave:* edifício “Gaioleiro”; eficiência energética; ensaio de gás traçador; ensaio de pressurização; permeabilidade ao ar da envolvente; qualidade do ar interior; reabilitação; sistema de ventilação natural; ventilação.

## ABSTRACT

The “*Gaioleiro*” buildings, in continuity with the *Pombalino* buildings, are a set of architectural and cultural of great importance, expressed in Lisbon and therefore essential their preservation and rehabilitation to address some existing security concerns, the energy efficiency enhancement and valorization.

The current regulation and concern for energy conservation, based on the principles of the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD), seek to improve the energy efficiency of new buildings and major rehabilitations. In recent decades, these issues have been exhaustively investigated and developed, establishing new energy conservation concepts through different platforms as environmental, economic and social. However, experimental characterization of buildings ventilation system and its influence on thermal performance is scarce, not existing documented work related to the “*Gaioleiro*” buildings. For the correct efficiency evaluation of rehabilitation solutions to implement in these buildings, it is essential to properly study their natural ventilation system.

In this sense, this dissertation aims to experimentally characterize the ventilation system of a “*Gaioleiro*” building through fan pressurization and tracer gas testing. Pressurization tests are intended to evaluate the air permeability of the surrounding components and subsequently support the estimated rate of air leaks. Through the tracer gas tests, designed to measure the average air change rates, was evaluated the air exchange rates for the current building condition, the impact of exhaust ventilator installed in the chimney duct and the impact of air permeability improvements (window frames). This experimental evaluation allowed to characterize the current building performance and support the development and validation of the building ventilation model. With the model validated, were studied the impact in air change rate of usual improvements implemented in rehabilitations, safeguarding the indoor air quality and energy efficiency demands as a contribution to building rehabilitations and their indispensable sustainability.

From experimental work it was exposed that if simply air permeability improvements are implemented there is a high risk of an insufficient ventilation rate, despite the higher air renewal rate in RCCTE for these new situations. In conclusion, the window frames are the elements which contribute mostly to the air permeability of the envelop (60%). The air permeability of this building is very high, and the thermal performance can be substantially improved by 50% through interventions in the window frames and trickle vents.

*Key-words:* “*Gaioleiro*” building; airtightness measures; energy efficiency; interior air quality; envelope air permeability; fan pressurization test; natural ventilation system; rehabilitation; tracer gas decay test; ventilation.



## **AGRADECIMENTOS**

Ao Eng.º Armando Pinto, como orientador científico, desejo expressar o meu agradecimento pela oportunidade dada em realizar esta dissertação, a disponibilidade e apoio durante todo este período e ainda os importantes conhecimentos transmitidos.

À Eng.ª Alexandra Costa, co-orientadora desta dissertação, pela importante ajuda dispensada neste trabalho e o contacto proporcionado entre o Instituto Superior de Engenharia de Lisboa e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, particularmente o Departamento de Edifícios, pelos equipamentos e materiais disponibilizados para realização os ensaios experimentais. Em especial ao Eng.º Hildebrando Cruz, pela ajuda na calibração das sondas de pressão, bem como a sua disponibilidade e apoio.

À ajuda de todos os técnicos do Núcleo de Acústica, Iluminação, Componentes e Instalações (NAICI), particularmente aos técnicos Sr.ª Rosa Soares, Sr. José Martins, Sr. Luís Costa e ao Sr. Carlos Saldanha.

Agradeço ao Arq. Fernando Gaio da empresa ASSIMEC e ao Fundo de Investimento Imobiliário Fechado Sete Colinas as condições proporcionadas para a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço à minha tia e avó a ajuda neste e em todos os outros períodos da minha vida.



# ÍNDICE

RESUMO.....	I
ABSTRACT.....	III
AGRADECIMENTOS .....	V
ÍNDICE.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XI
ÍNDICE DE QUADROS .....	XV
SIGLAS E ACRÓNIMOS .....	XVII
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO .....	1
1.2. OBJECTIVOS DO TRABALHO .....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TEXTO.....	3
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>5</b>
2.1. ASPECTOS GERAIS .....	5
2.2. EDIFÍCIOS “GAIOLEIROS” .....	6
2.2.1. Enquadramento histórico .....	6
2.2.2. Tipologia construtiva .....	7
2.2.3. Sistema de ventilação dos edifícios “Gaioleiros” .....	13
2.3. VENTILAÇÃO .....	14
2.3.1. Enquadramento.....	14
2.3.2. Características da permeabilidade ao ar dos edifícios .....	16
2.3.3. Mecanismos de ventilação natural .....	19
2.3.4. Sistemas de ventilação .....	24
2.3.4.1. Sistema de ventilação natural.....	25
2.3.4.2. Sistema de ventilação mecânica.....	28
2.3.4.3. Sistema de ventilação misto e híbrido .....	30
2.3.5. Aberturas de ventilação na envolvente.....	31
2.4. MÉTODOS DE ENSAIO.....	33
2.4.1. Aspectos gerais.....	33
2.4.2. Ensaio de pressurização .....	34
2.4.3. Ensaio de gás traçador .....	37
2.5. MODELOS DE ESTIMATIVA DOS CAUDAIS DE VENTILAÇÃO .....	41
<b>3. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO ESTUDADO .....</b>	<b>49</b>
3.1. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DO ESPAÇO ENVOLVENTE .....	49
3.2. CARACTERIZAÇÃO GERAL.....	50
3.3. CLIMA.....	53
3.3.1. Considerações gerais.....	53
3.3.2. Temperatura .....	54
3.3.3. Direcção do vento e brisas .....	55

3.3.4.	Velocidade do vento e brisas .....	56
3.3.5.	Escoamento do vento em torno do edifício e coeficientes de pressão .....	61
<b>4.</b>	<b>METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>69</b>
4.1.	ASPECTOS GERAIS .....	69
4.2.	ENSAIO DE PRESSURIZAÇÃO .....	69
4.3.	ENSAIO DE GÁS TRAÇADOR.....	72
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS DA AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA PERMEABILIDADE AO AR DA ENVOLVENTE E DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO .....</b>	<b>75</b>
5.1.	PERMEABILIDADE AO AR DA ENVOLVENTE .....	75
5.1.1.	Resultados dos ensaios.....	75
5.1.2.	Análise da repetibilidade dos ensaios .....	77
5.1.3.	Análise dos resultados dos ensaios .....	77
5.1.4.	Curvas características dos componentes da envolvente .....	78
5.1.5.	Análise da permeabilidade dos componentes da envolvente .....	80
5.2.	MEDIÇÃO DA TAXA DE RENOVAÇÃO DO AR.....	81
5.2.1.	Ensaio G1 – Situação actual do edifício.....	81
5.2.2.	Ensaio G2 – Conduta da chaminé selada .....	83
5.2.3.	Ensaio G3 – Conduta da chaminé selada e frinchas vedadas.....	84
5.2.4.	Estimativa da incerteza .....	85
5.2.5.	Análise comparativa dos resultados.....	86
<b>6.</b>	<b>DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO.....</b>	<b>87</b>
6.1.	ASPECTOS GERAIS .....	87
6.2.	MÉTODO DE CÁLCULO.....	87
6.2.1.	Modelo nodal do sistema de ventilação .....	88
6.3.	VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO DE VENTILAÇÃO .....	90
6.3.1.	Caso G1 – Situação actual do edifício .....	90
6.3.2.	Caso G2 – Conduta da chaminé selada .....	91
6.3.3.	Caso G3 – Conduta da chaminé e frinchas seladas.....	92
6.3.4.	Síntese.....	93
<b>7.</b>	<b>ESTUDO DE OPORTUNIDADES DE MELHORIA .....</b>	<b>95</b>
7.1.	ASPECTOS GERAIS .....	95
7.2.	REQUISITOS DE QUALIDADE DO AR INTERIOR .....	95
7.3.	IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE OPORTUNIDADES DE MELHORIA .....	96
7.4.	RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DAS OPORTUNIDADES DE MELHORIA – $R_{ph}$ e $N_{ic}$ .....	100
7.4.1.	Cenário M0 - Situação actual do edifício “Gaioleiro” .....	101
7.4.2.	Cenário M1 - Melhoria da permeabilidade das janelas com custo reduzido .....	101
7.4.3.	Cenário M2, M3 E M4 - Melhoria da permeabilidade das janelas com custo reduzido e ou instalação de janelas classe 4 e ou exaustor na chaminé.....	102
7.4.4.	Cenário M5 - Instalação de janelas classe 4 e grelhas de ventilação.....	102
7.4.5.	Cenário M6 - Instalação de janelas classe 4, grelhas de ventilação e exaustor na chaminé.....	103

7.4.6.	Cenário M7 - Sistema de ventilação mecânico VMC .....	104
7.4.7.	Cenário M5 - De acordo com a NP 1037-1:2002 (para aparelhos a gás tipo A e B).....	105
7.4.8.	Síntese da avaliação das oportunidades de melhoria.....	106
7.4.9.	Comparação dos valores estimados de $R_{ph}$ e os definidos pelo RCCTE .....	107
<b>8.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>109</b>
8.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	109
8.2.	PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS .....	111
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>113</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>117</b>
	ANEXO A.....	A.1
	ANEXO B.....	B.1
	ANEXO C.....	C.1
	ANEXO D.....	D.1
	ANEXO E.....	E.1
	ANEXO F.....	F.1



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Cronologia das tipologias construtivas Pombalina e “Gaioleiro”. Não estão representadas as tipologias anteriores e posteriores.....	7
Figura 2.2 - Identificação dos principais elementos físicos e construtivos dos edifícios "Gaioleiros" diferenciadores dos edifícios Pombalinos. ....	7
Figura 2.3 - Paredes interiores de frontal pombalino e de tabique.....	9
Figura 2.4 - Paredes exteriores e interiores do edifício estudado. a) Alvenaria de tijolo maciço numa parede de empena, sem disposição definida. b) Parede de frontal pombalino com preenchimento descuidado recorrendo a materiais diversos. c) Parede de tabique, servindo de divisão entre o espaço o interior da habitação e a caixa de escadas. d) Parede de tabique, divisão interior.....	10
Figura 2.5 - Frechais de apoio aos vigamentos do pavimento e a descarga nas paredes de frontal (interiores) e paredes exteriores.....	11
Figura 2.6 - Pavimento do edifício estudado. a) Frinchas entre elementos do soalho. b) Apoio dos vigamentos do pavimento sobre um frechal com descarga na parede exterior. c) Frincha na ligação entre o pavimento e a parede interior, devido ao assentamento do pavimento. ....	11
Figura 2.7 - Vista exterior do edifício estudado. a) Fachada principal. b) Janelas de sacada e de peito no mesmo piso. ....	12
Figura 2.8 - Comparação entre levantamentos topográficos da zona do edifício estudado, datados de 1807 e 1856. a) Inexistência do edifício estudado em 1807, Planta da Cidade de Lisboa e Belém. b) Edifício estudado em 1856, Carta Topográfica de Lisboa.....	13
Figura 2.9 - Vãos envidraçados do edifício estudado. a) Janelas de sacada sem perfil de soleira. b) Pormenor da junta móvel das janelas de peito e quadrícula dos vidros. c) Mecanismo de fecho tipo cremona presente nas janelas de sacada e de peito. ....	14
Figura 2.10 - Exposição média do Homem a alguns contaminantes (%) em diversos locais do dia-a-dia. ....	15
Figura 2.11 - Regulação do sistema de ventilação em função da qualidade do ar interior .....	16
Figura 2.12 - Distribuição do coeficiente de pressão pela acção do vento. a) Edifício com baixo perfil e cobertura inclinada (alçado). b) Edifício com alto perfil e cobertura em terraço (alçado). c) Edifício isolado de planta quadrada (planta) .....	20
Figura 2.13 - Conversão dos valores de velocidade do vento registado em determinado local para outro....	22
Figura 2.14 - Gradiente de pressão devido ao efeito de chaminé para $T_{ext} > T_{int}$ . a) Efeito de chaminé em edifícios sem ligação entre zonas. b) Efeito de chaminé em edifícios com ligação entre zonas. ....	23
Figura 2.15 - Exemplo das pressões resultantes da acção do vento sobre uma superfície (fachada) e do efeito gradiente térmico.....	24
Figura 2.16 - Sistemas de ventilação. a) Ventilação natural (cruzada). b) Ventilação mecânica (extracção). c) Ventilação híbrida e modo misto. ....	24
Figura 2.17 - Ventilação em fachada única e configurações da ventilação cruzada. a) Fachada única. b) Cruzada. c) Cruzada assistida por torres de vento. d) Cruzada assistida por condutas.....	26
Figura 2.18 - Ventilação por tiragem térmica através de condutas verticais. a) Configuração adjacente. b) Configuração sobreposta. c) Configuração acessória.....	27
Figura 2.19 - Ventilação por tiragem térmica assistida por chaminé solar, zonas de transição e fachada dupla. a) Chaminé solar. b) Zonas de transição. c) Fachada dupla. ....	28
Figura 2.20 - Sistema de ventilação mecânico centralizado. a) Admissão de ar através de aberturas e exaustão mecânica (fluxo simples). b) Admissão e exaustão mecânica (fluxo duplo). ....	29

Figura 2.21 - Sistemas de ventilação misto e híbrido. a) Sistema misto. b) Sistema híbrido. c) Exemplo de ventiladores centrífugos utilizados na ventilação modo misto. d) Exemplo de ventiladores helicoidais utilizados na ventilação híbrida. ....	31
Figura 2.22 - Dispositivos de ventilação. a) Grelha superficial. b) Grelha de encastramento na parede. c) Grelha mural de lâminas. d) Grelha regulável instalada entre envidraçado e caixilharia. e) Grelha regulável instalada na cobertura. ....	31
Figura 2.23 - Diferentes modos de instalação de grelhas de ventilação nos vãos envidraçados. a) Acima da caixilharia. b) Na caixilharia. c) Entre a caixilharia e envidraçado. d) Na caixa de estore. ..	32
Figura 2.24 - Grelhas de ventilação reguláveis. a) Grelha com a abertura desobstruída. b) Grelha com a abertura obstruída. c) Grelha regulável com redutor acústico: (1) Aba regulável.....	32
Figura 2.25 - Grelha de ventilação auto-regulável a 2 Pa. a) Grelha instalada entre a caixilharia e envidraçado. b) Mecanismo de funcionamento da grelha, com a abertura desobstruída: (1) Aba auto-regulável; (2) Aba regulável. c) Caudal de ar debitado pela grelha auto-regulável a 2 Pa. ....	33
Figura 2.26 - Exemplo do resultado obtido em ensaios de pressurização e despressurização, e respectivas equações de permeabilidade. ....	35
Figura 2.27 - Exemplo da determinação da taxa de renovação de ar horária de uma habitação utilizando a técnica do declive.....	39
Figura 2.28 - Esquema de ensaio de gás traçador pelo método do decaimento ou declive .....	40
Figura 3.1 - Localização do edifício estudado. a) Proximidade do edifício ao estuário do Rio Tejo (distância ao rio: 150 m e cota acima do nível do mar: 6 m) e restante espaço envolvente. Edifício estudado e edifícios vizinhos na Rua Jardim do Tabaco (altura máxima dos edifícios de 25 m). b) Vista NE-SO. c) Vista SO-NE. ....	49
Figura 3.2 - Edifício estudado. a) Fachada principal, orientada a Noroeste (NO). b) Fachada posterior, orientada a sudeste (SE). c) Localização e envolvente ao edifício estudado. d) Fachada do piso 2.....	50
Figura 3.3 - Edifício e piso estudado. a) Imagem do edifício 3D e corte AA'. b) Planta da habitação estudada (piso 2).....	51
Figura 3.4 - Chaminé do edifício estudado. a) Vista geral. b) Abertura da chaminé (secção: 1,20x0,50 m <sup>2</sup> ). c) Conduta vertical da chaminé (secção: 1,00x0,25 m <sup>2</sup> ; altura: 7,50 m). d) Ventilador estático (altura acima da cobertura: 1,00 m).....	52
Figura 3.5 - Locais de maior degradação do edifício estudado. a) Frincha no pavimento devido a deterioração. b) Parede de tabique deteriorada no piso 1 (divisão entre cozinha e caixa-de-descidas). c) Frincha entre parede de tabique e pavimento de madeira devido abaulamento do pavimento do piso 2 (revestimento em azulejo e mosaico). d) Frincha entre o perfil inferior das janelas de sacada e a soleira. e) Destacamento do reboco do tecto. ....	53
Figura 3.6 - Temperatura na atmosfera urbana de Lisboa: a) Ilha de calor nocturna (vento de Norte moderado). Desvio da temperatura em relação a Portela/Lisboa (Aeroporto): b) Brisas provenientes do estuário. c) Ventos provenientes do quadrante Norte.....	54
Figura 3.7 - Rosa-dos-ventos em diferentes períodos para a cidade de Lisboa. Dados climáticos publicados pelo Instituto de Meteorologia (1971-1980) e compilados pelo INETI.....	55
Figura 3.8 - Mapa da intensidade do vento ao longo do dia e ano para a cidade de Lisboa (médias horárias). Dados climáticos publicados pelo Instituto de Meteorologia (1971-1980) e compilados pelo INETI.....	56
Figura 3.9 - Distribuições frequências no período de 1971-1980 em Lisboa (estação meteorológica Lisboa/Portela). a) Estação de Primavera: $A = 5,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $k = 2,07$ . b) Estação de Verão: $A = 6,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $k = 2,50$ . c) Estações de Outono e Inverno: $A = 3,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $k = 1,36$ . ....	57
Figura 3.10 - Classes de ventilação em Lisboa.....	57
Figura 3.11 - Mapa de rugosidade de Lisboa nos anos 80.....	58

Figura 3.12 - Registo dos valores do diferencial de pressão entre interior e exterior nas duas fachadas, para a <i>Condição 1</i> , e a velocidade do vento registada numa estação meteorológica próxima. ..60	60
Figura 3.13 - Registo dos valores do diferencial de pressão entre interior e exterior nas duas fachadas, para a <i>Condição 2</i> , e a velocidade do vento registada numa estação meteorológica próxima. ..60	60
Figura 3.14 - Modelação da área envolvente ao edifício estudado (a vermelho) e simulação em túnel de vento do comportamento do vento segundo várias direcções .....61	61
Figura 3.15 - Modelação utilizada no programa de simulação <i>Cp Generator</i> do edifício estudado e obstáculos. a) Obstáculos definidos na modelação. b) Posicionamento dos edifícios. c) Definição das rugosidades segundo as várias direcções ( $D_{obs}$ : distância do edifício ao obstáculo e $H_{obs}$ : altura do obstáculo). .....63	63
Figura 3.16 - Exemplo da determinação dos valores $C_p$ na fachada F2, para vento com direcção incidente $\alpha = 225^\circ$ . a) Definição do ângulo $\alpha$ . b) Exemplo da distribuição do coeficiente de pressão ao longo da superfície da fachada F2. c) Valores médios estimados de $C_p$ e enquadramento ao edifício estudado. ....64	64
Figura 3.17 - Parâmetros utilizados na determinação do nível de protecção do edifício ao vento devido a obstáculo. ....66	66
Figura 3.18 - Principais obstáculos ao edifício estudado. a) Vista em 3D do edifício em estudado (vermelho) e obstáculos. b) Dimensões utilizadas na determinação do nível de protecção do edifício segundo a orientação Noroeste e Sudeste. ....66	66
Figura 4.1 - Ensaio de pressurização. a) Porta ventiladora instalada (vista pelo exterior da habitação). b) Equipamento utilizado nos ensaios de pressurização e porta ventiladora (vista pelo interior). c) Utilização do gerador de fumo e porta ventiladora para a detecção de frinchas na envolvente.....70	70
Figura 4.2 - Representação do esquema experimental utilizado na determinação da permeabilidade ao ar do tecto do piso 2 (S3-S4). a) Ensaio de pressurização S3. b) Ensaio de pressurização S4.....71	71
Figura 4.3 - Locais de instalação dos analisadores de gás $CO_2$ : $A_1$ : sala, $A_2$ : quarto 3. ....72	72
Figura 5.1 - Comparação dos valores de $n_{50}$ obtidos nos ensaios de pressurização S1, S2 e S3.....77	77
Figura 5.2 - Edifício adjacente, tipo Pombalino com obras de reabilitação e modernização. a) Janelas de peito (idêntico ao edifício estudado). b) Janela de sacada (vista pelo interior da habitação). c) Janela de sacada (vista pelo exterior). Medidas de melhoria da permeabilidade ao ar e à água: soleira em pedra trabalhada, perfil de alumínio e vedante. ....78	78
Figura 5.3 - Curvas de permeabilidade ao ar obtidas de acordo com os valores médios dos resultados dos ensaios de pressurização. ....79	79
Figura 5.4 - Curvas de permeabilidade ao ar utilizadas na determinação das respectivas equações de permeabilidade dos vários componentes da envolvente. ....80	80
Figura 5.5 - Análise do impacto dos diferentes componentes da envolvente do edifício estudado. a) Influência de cada componente na ventilação global da habitação. b) Influência das componentes na ventilação com origem em infiltrações. ....80	80
Figura 5.6 - Desenvolvimentos da concentração de gás traçador registado longo do ensaio G1 pelos analisadores $A_1$ (compartimento junto à fachada NO) e $A_2$ (compartimento junto à fachada SE). ....82	82
Figura 5.7 - Decaimento da concentração de $CO_2$ registado no ensaio G1, decorrido no dia 6 de Maio de 2011 entre 16:30 e 18:30.....82	82
Figura 5.8 - Desenvolvimentos da concentração de gás traçador registado longo do ensaio G2 pelos analisadores $A_1$ (compartimento junto à fachada NO) e $A_2$ (compartimento junto à fachada SE). ....83	83
Figura 5.9 - Decaimento da concentração de $CO_2$ registado no ensaio G2, decorrido no dia 10 de Maio de 2011 entre 13:00 e 14:45. ....83	83

Figura 5.10 - Desenvolvimentos da concentração de gás traçador registado longo do ensaio G3 pelos analisadores A <sub>1</sub> (compartimento junto à fachada NO) e A <sub>2</sub> (compartimento junto à fachada SE).....	84
Figura 5.11 - Decaimento da concentração de CO <sub>2</sub> registado no ensaio G3, decorrido nos dias 10 e 11 de Maio de 2011 entre 15:45 e 11:30. ....	84
Figura 6.1 - Representação do modelo nodal do sistema de ventilação da habitação estudada (pisos 2). ....	89
Figura 6.2 - Distribuição do coeficiente de permeabilidade, C, para simulação dos ensaios G1, G2 e G3. ....	90
Figura 6.3 - Representação gráfica dos parâmetros utilizados no modelo numérico para a simulação do ensaio G1 de gases traçadores. As resistências ao fluxo de ar na fachada e janelas NO são respectivamente iguais às indicadas na fachada SE (sendo C distribuído de acordo com a Figura 6.2).....	91
Figura 6.4 - Representação gráfica dos parâmetros utilizados no modelo numérico para a simulação do ensaio G2 de gases traçadores. As resistências ao fluxo de ar na fachada e janelas NO são respectivamente iguais às indicadas na fachada SE (sendo C distribuído de acordo com a Figura 6.2).....	92
Figura 6.5 - Representação gráfica dos parâmetros utilizados no modelo numérico para a simulação do ensaio G3 de gases traçadores. As resistências ao fluxo de ar na fachada e janelas NO são respectivamente iguais às indicadas na fachada SE (sendo C distribuído de acordo com a Figura 6.2).....	93
Figura 7.1 - Fitas vedantes utilizadas na calafetagem de juntas móveis de caixilharias. a) Fitas vedantes com autocolante. b) Calafetagem da junta móvel de uma porta. ....	97
Figura 7.2 - Configuração das grelhas de admissão de ar auto-reguláveis a 2 Pa (GRE). a) Sistema de ventilação natural. b) Sistema de ventilação mecânico centralizado (VMC).....	99
Figura 7.3 - Comparação dos valores de $R_{ph}$ e $N_{ic}$ dos cenários de reabilitação propostos. ....	101
Figura 7.4 - Comparação da taxa de renovação do ar média, ao longo da estação de aquecimento, entre o cenário actual (M0) e a melhoria do sistema de ventilação através do cenário de reabilitação M1. ....	102
Figura 7.5 - Comparação da taxa de renovação do ar média, ao longo da estação de aquecimento, entre o cenário actual (M0) e a melhoria do sistema de ventilação através do cenário de reabilitação M5. ....	102
Figura 7.6 - Comparação da taxa de renovação do ar média, ao longo da estação de aquecimento, entre o cenário actual (M0) e a melhoria do sistema de ventilação através do cenário de reabilitação M6. ....	103
Figura 7.7 - Funcionamento do sistema de ventilação mecânico centralizado ao longo do dia para o cenário de reabilitação M7. Admissão de ar através de grelhas de ventilação nas fachadas (NO e SE) e exaustão através das condutas localizadas na cozinha e instalação sanitária. ....	104
Figura 7.8 - Comparação da taxa de renovação do ar média, ao longo da estação de aquecimento, entre o cenário actual (M0) e o sistema de ventilação mecânico, cenário de reabilitação M7. ....	105

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Permeabilidade ao ar a 100 Pa, segundo a área total do elemento e ou comprimento das juntas móveis, para as classes 1 a 4 de vãos envidraçados e portas. ....	18
Quadro 2.2 - Permeabilidade ao ar a 50 Pa, segundo a área total do elemento e ou comprimento das juntas móveis, para as classes 1 a 4 de vãos envidraçados e portas. ....	19
Quadro 2.3 - Coeficientes de pressão pela acção do vento sobre uma superfície. ....	21
Quadro 2.4 - Rugosidade de diferentes tipos de superfície. ....	21
Quadro 2.5 - Determinação do coeficiente $a$ e $b$ da expressão (2.18). ....	41
Quadro 2.6 - Caudais de ventilação em fachada única. Modelo BS 5925:1991. ....	42
Quadro 2.7 - Caudais gerados em ventilação cruzada. Modelo BS 5925:1991 ....	42
Quadro 2.8 - Determinação dos factores de correcção do Modelo <i>LBL</i> . ....	44
Quadro 2.9 - Coeficientes relativos ao tipo de terreno. Modelo <i>LBL</i> melhorado ....	46
Quadro 2.10 - Coeficiente relativo ao nível de protecção. Modelo <i>LBL</i> melhorado. ....	46
Quadro 3.1 - Síntese das principais dimensões da habitação estudada (pisos 2). ....	51
Quadro 3.2 - Valores característicos da espessura da camada limite atmosférica e do expoente do perfil de velocidade do vento, em função do tipo de superfície. ....	59
Quadro 3.3 - Coeficientes de pressão estimados através do programa de simulação <i>Cp Generator</i> . ....	63
Quadro 3.4 - Coeficientes de pressão de edifícios em U, fachada SE. ....	64
Quadro 3.5 - Coeficientes de pressão de edifícios isolados com planta rectangular, fachada NO e cobertura. ....	65
Quadro 3.6 - Níveis de protecção em função da distância entre elementos e altura do obstáculo. ....	66
Quadro 3.7 - Determinação do nível de protecção proporcionado pelos obstáculos sobre a fachada NO e SE segundo diferentes direcções do vento. ....	66
Quadro 5.1 - Resultados da campanha de ensaios de pressurização S1. ....	75
Quadro 5.2 - Resultados da campanha de ensaios de pressurização S2. ....	76
Quadro 5.3 - Resultados da campanha de ensaios de pressurização S3. ....	76
Quadro 5.4 - Resultados da campanha dos ensaios de pressurização S4 e S5. ....	76
Quadro 5.5 - Síntese dos principais resultados obtidos nos ensaios de pressurização. ....	77
Quadro 5.6 - Determinação dos caudais de ar para vários valores de $\Delta p$ (idêntico à gama de diferenciais de pressão utilizada nos ensaios realizados). ....	78
Quadro 5.7 - Equações de permeabilidade ao ar dos vários componentes da envolvente. ....	79
Quadro 5.8 - Intervalos de confiança, $F_n$ , das taxas de renovação do ar. ....	85
Quadro 5.9 - Síntese das condições ambientais e resultados dos ensaios G1, G2 e G3. ....	86
Quadro 6.1 - Comparação entre os resultados obtidos nos ensaios de gás traçador e modelo numérico. ....	93
Quadro 7.1 - Síntese dos cenários de reabilitação e medidas propostas. ....	99
Quadro 7.2 - Taxa de renovação do ar e $N_{ic}$ estimados para a situação actual e cenários de reabilitação. ..	101
Quadro 7.3 - Dimensionamento do sistema ventilação natural para aparelhos a gás tipo A e B. ....	105
Quadro 7.4 - Melhoria da eficiência energética pela implementação dos cenários de reabilitação. ....	107
Quadro 7.5 - Comparação entre valores de $R_{ph}$ estimados através do modelo numérico e os definidos pelo RCCTE na avaliação da eficiência energética. ....	107



## SIGLAS E ACRÓNIMOS

Símbolo	Descrição	Unidade
$A$	área de uma abertura ou frincha área de uma superfície	$m^2$
$b$	comprimento de uma abertura ou frincha	m
$C$	coeficiente de escoamento	-
$c$	concentração	ppm
$C_d$	coeficiente de descarga	-
$C_p$	coeficiente de pressão pela acção do vento	-
$ELA$	área de permeabilidade equivalente	$cm^2$
$E_n$	erro padrão	-; %
$F_n$	intervalo de confiança	%
$g$	aceleração da gravidade	$ms^{-2}$
$G$	caudal de gás introduzido no interior de um espaço situação de ensaio de gás traçador	$m^3 s^{-1}$
$g_{\perp \text{vidro}}$	factor solar dos vãos envidraçados	-
$GD$	graus dia	$^{\circ}C \cdot dia$
$h$	altura de uma abertura ou frincha	m
$k$	número de amostras coeficiente de escoamento função da geometria da abertura	- $m^3 s^{-1} m^{-1} Pa^{-1}$
$L$	profundidade da abertura comprimento de conduta vertical	m
$M$	situação de de melhoria ou de reabilitação	
$n$	expoente referente à equação de permeabilidade ao ar referente à renovação horária de ar obtida através do ensaio de pressurização a diferencial de pressão	- $h^{-1}$
$N_i$	limite das necessidades nominais de energia útil para aquecimento	$kWh \cdot m^{-2} \cdot ano^{-1}$
$N_{ic}$	necessidades nominais de energia útil para aquecimento	$kWh \cdot m^{-2} \cdot ano^{-1}$
$p$	pressão	Pa
$Q$	caudal escoado através da abertura	$m^3 \cdot h^{-1}$ ; $m^3 \cdot s^{-1}$
$q$	indicador da permeabilidade ao ar a determinado diferencial de pressão por unidade de área de envolvente	$m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$
$Q_n$	potência nominal de aparelho a gás	kW
$R_{ph}$	renovação horária	$h^{-1}$
$s$	incerteza relativa total	-
$S$	situação de ensaio de pressurização	-
$T$	temperatura	K; $^{\circ}C$
$t$	tempo valor de acordo com a distribuição <i>t-Student</i>	s; h -
$U$	velocidade do vento	$m \cdot s^{-1}$
$U_w$	coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado	$Wm^{-2} \cdot ^{\circ}C$
$v$	velocidade	$m \cdot s^{-1}$
$V$	volume	$m^3$
$w$	indicador da permeabilidade ao ar a determinado diferencial de pressão por unidade de área de pavimento	$m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$
$z_0$	rugosidade do terreno	m
$\varepsilon$	quociente entre áreas	-

Símbolo	Descrição	Unidade
$\beta$	coeficientes	-
$\Delta$	diferença	Pa; °C; K
$\rho$	densidade do ar	kg·m <sup>-3</sup>
$\mu$	viscosidade absoluta do ar	Pa·s
$\delta$	espessura da camada limite atmosférica	m
$\alpha$	Ângulo	°
$\phi$	Diâmetro	mm

### *Índices inferiores*

Símbolo	Descrição
$0$	referente às condições de referência (temperatura e pressão)
$50$	referente ao diferencial de pressão de 50 Pa
$E$	referente à área de envolvente
$Edif$	referente ao edifício
$ext$	referente ao exterior
$F$	referente à área de pavimento
$G$	referente às situações de ensaio de gás traçador
$hab$	referente à habitação
$int$	referente ao interior
$int-ext$	referente à diferença entre o interior e o exterior
$máx$	referente ao valor máximo
$met$	referente à estação meteorológica
$mín$	referente ao valor mínimo
$pav$	referente ao pavimento
$ref$	referente a determinado local ou altura de referência
$s$	referente ao efeito de gradiente térmico
$S$	referente às situações de ensaio de pressurização
$t$	referente ao caudal total
$w$	referente ao vento

### *Índices superiores*

Símbolo	Descrição
$n$	referente ao expoente de escoamento
$\alpha$	referente ao expoente do perfil de velocidades do vento

### *Siglas*

Siglas	Descrição
CLA	camada limite atmosférica
CO <sub>2</sub>	dióxido de carbono
COZ	cozinha
EN	Norma Europeia
EPBD	Directiva relativa ao Desempenho Energético de Edifícios
GRE	grelha auto regulável
IC	ilha de calor
IS	instalação sanitária
ISO	International Organization for Standardization

Siglas	Descrição
iiBSE	International Initiative for a Sustainable Built Environment
JB	janela basculante
JP	janela de peitoril
JS	janela de sacada
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
N, NE, E, SE, S, SO, O, NO	pontos cardiais: Norte, Nordeste, Este, Sudeste, Sul, Sudoeste, Oeste, Noroeste.
NP	Norma Portuguesa
QAI	qualidade do ar interior
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
UTAN	unidade de tratamento de “ar novo”
VMC	ventilação mecânica centralizada



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. ENQUADRAMENTO

Preservar uma construção existente apresenta, em geral, vantagens económicas, ambientais e sociais em comparação com a demolição e reconstrução, sendo o custo total da intervenção de reabilitação menor do que o da construção de um edifício novo [1]. Por estes motivos nos próximos anos a reabilitação de edifícios será, provavelmente, uma das poucas áreas de crescimento do sector da Construção Civil em Portugal e constitui uma das linhas que de maior investigação carece. As vantagens da reabilitação do edificado não se limitam à perspectiva económica, estendendo-se a outras vertentes como a melhoria do ambiente urbano e o desenvolvimento sustentável. Neste sentido, os edifícios do tipo “Gaioleiro”, em continuidade com os edifícios do tipo Pombalino, são um conjunto arquitectónico e cultural de elevada importância, sendo essencial a sua conservação e reabilitação.

Em Portugal, como nas restantes sociedades desenvolvidas, o consumo de energia nos edifícios é significativo, podendo corresponder a cerca de 30% do consumo total de energia primária, sendo traduzida essencialmente através de energia (electricidade) para equipamentos (no qual se encontra incluída a energia para climatização) e iluminação [2]. Relativamente às soluções construtivas do edifício estas deverão ter soluções que minorem as necessidades térmicas e os consumos de energia para ventilação, iluminação e águas quentes sanitárias.

Estas preocupações encontram-se regulamentadas, principalmente desde 1990 com a publicação do RCCTE. Com a integração de Portugal na CE e com as preocupações ambientais e de eficiência energética europeia, foi publicada a directiva EPBD, que foi transposta para Portugal em 2006 com a publicação dos Decretos-Lei 78,79,80. Os requisitos de eficiência energética (RCCTE) são aplicáveis a edifícios novos ou sujeitos a grandes reabilitações. Esta directiva foi recentemente reformulada, Directiva 2010/31/EU, recomendando o aumento da eficiência energética e o estabelecimento de limite com base na viabilidade técnico-económica.

Contudo existe um grande conjunto de habitações (96% das habitações são anteriores a 2006 e 72% anteriores a 1990, [3] e [4]) que não foram abrangidas por estes requisitos legais de desempenho térmico, centrando-se este trabalho nos edifícios do tipo “Gaioleiro”, que são expressivos na cidade de Lisboa. Na aplicação do RCCTE para determinar as necessidades térmicas nominais é efectuado um balanço térmico do edifício em regime estacionário, no qual são calculadas as perdas térmicas por condução através da envolvente, os ganhos solares e as trocas de calor associadas à ventilação. As perdas térmicas por ventilação eram inicialmente calculadas considerando a taxa de renovação de ar horária ( $R_{ph}$ ) um valor de 1,0 na versão 1990 do RCCTE [5]. Na versão de 2006 do RCCTE [6] é efectuada uma distinção entre ventilação natural e mecânica. Na ventilação natural, procura-se incentivar a melhoria da permeabilidade ao ar da envolvente, sendo apresenta-

dos valores de  $R_{ph}$  atendendo às características de alguns componentes do sistema de ventilação, contudo os valores apresentados afastam-se de valores reais (por exemplo, um edifício sem grelhas de admissão de ar apresenta maior taxa de renovação de ar que um edifício com grelhas de admissão). De uma forma geral, a caracterização experimental do sistema de ventilação e a sua influência no desempenho térmico de edifícios é escassa, não se conhecendo trabalhos em edifícios do tipo “Gaioleiro” ou mesmo noutras tipologias. Devido à grande diferença que existe entre este tipo de construção e a actual é essencial o estudo e o conhecimento do sistema de ventilação natural destes edifícios (e outros semelhantes como edifícios Pombalinos), para uma correcta avaliação de medidas de reabilitação.

## 1.2. OBJECTIVOS DO TRABALHO

A presente dissertação pretende caracterizar a ventilação de um edifício do tipo “Gaioleiro”, situado em Lisboa, avaliando experimentalmente:

- a permeabilidade ao ar da envolvente e os componentes da envolvente, através de ensaios de pressurização;
- a perda de carga da conduta da chaminé do fogão, através de ensaios de pressurização;
- a taxa de renovação de ar do edifício, através de ensaios com gás traçador, e;
- a taxa de renovação de ar do edifícios implementando algumas oportunidade de melhoria, através de ensaios com gás traçador.

Com estes dados experimentais pretende-se desenvolver e implementar o modelo de ventilação do edifício e proceder à validação do mesmo. Com esse modelo validado, pretende-se estimar as taxas de ventilação médias anuais do edifício, no seu estado actual e também face a medidas de melhoria. Os resultados obtidos permitem perspectivar algumas medidas para uma reabilitação sustentável.

Na definição das intervenções de reabilitação devem ser compatibilizados, de entre outros aspectos, as exigências de eficiência energética de qualidade do ar interior e as restrições arquitectónicas e construtivas.

Devido ao reduzido conhecimento e caracterização experimental dos sistemas de ventilação, nomeadamente no que respeita ao edificado português, este trabalho pretende contribuir para o crescimento e desenvolvimento desta área, em geral subvalorizada. Neste sentido, em complemento ao trabalho elaborado, foram divulgadas na *Conferência Nacional iiSBE – “Sustentabilidade na Reabilitação Urbana: O novo Paradigma do Mercado da Construção”* as principais directrizes e resultados do estudo desenvolvido. A participação na conferência, que decorrido nos dias 29 e 30 de Setembro de 2011, compreendeu um *poster* e a publicação do texto “*Avaliação experimental da permeabilidade ao ar da envolvente e do sistema de ventilação. Edifício “Gaioleiro”.*” [7].

### 1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TEXTO

O presente trabalho encontra-se estruturado em sete partes:

- no capítulo 2, efectua-se a síntese da pesquisa bibliográfica sobre os edifícios do tipo “Gaioleiro”, permeabilidade ao ar dos edifícios, os mecanismos de ventilação e os sistemas de ventilação habitualmente utilizados em edifícios de habitação, evidenciando, entre estes, as várias soluções existentes e a sua aplicabilidade em função de determinados condicionalismos. Por fim, são expostos os métodos de ensaio utilizados na avaliação das infiltrações de ar pela envolvente e na determinação da taxa de renovação do ar (pressurização e gás traçador, respectivamente) e, ainda, os modelos de cálculo existentes para a estimativa dos caudais de ventilação, onde se inclui o modelo da norma EN 15242:2007 [8], base do modelo numérico implementado neste trabalho;
- no capítulo 3 é caracterizado o edifício estudado, nomeadamente os componentes relevantes no sistema de ventilação, e o espaço envolvente ao edifício. Apresenta, ainda, as condições ambientais de ventilação da cidade de Lisboa e a análise do escoamento do vento em torno do edifício estudado. Esta caracterização permite reunir dados importantes para a modelação do sistema de ventilação da habitação;
- no capítulo 4 é descrita a metodologia experimental e de cálculo utilizada no estudo do sistema de ventilação da habitação, de acordo com a normalização aplicável. Apresentam-se as condições de ensaio e as estratégias das campanhas experimentais utilizadas nos ensaios de pressurização, com fim à determinação dos diversos parâmetros característicos da permeabilidade ao ar. Na metodologia do ensaio de gás traçador, apresentam-se as condições dos ensaios para determinação da taxa de renovação do ar. Por fim, apresenta-se o modelo nodal do sistema de ventilação da habitação, implementado a partir da caracterização do efeito do vento sobre o edifício e das equações de permeabilidade ao ar da envolvente da habitação;
- o capítulo 5 expõe os resultados obtidos experimentalmente nos ensaios de pressurização e de gás traçador. Dos resultados dos ensaios de pressurização são ainda determinadas as equações de permeabilidade ao ar de vários componentes de ventilação que compõem a envolvente da habitação.
- o capítulo 6 apresenta a validação do modelo numérico, o preconizado na norma EN 15242:2007 [8], com base nos resultados do ensaio de gás traçador;
- no capítulo 7, são avaliadas teoricamente as taxas de renovação de diferentes cenários de melhoria e reabilitação utilizando o modelo numérico do sistema de ventilação, e;
- o capítulo 8, resume as principais conclusões do presente trabalho e recomendações relativas à correcta implementação de soluções de reabilitação em edifícios “Gaioleiros”, de acordo com os ensaios experimentais e os resultados teóricos obtidos pelo o modelo numérico.



## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. ASPECTOS GERAIS

Tendo em conta o objectivo e âmbito do trabalho, apresenta-se neste capítulo a síntese do estado da arte sobre: edifícios do tipo “Gaioleiro” e a diferença relativamente aos Pombalinos, a ventilação em edifícios habitacionais, métodos de ensaio utilizados na caracterização de sistemas de ventilação e modelos de estimativa dos caudais de ventilação.

Dos elementos disponíveis para a realização deste estudo não se encontra indicada a data de construção ou qualquer indicador referente à tipologia estrutural do edifício. Observando superficialmente alguns elementos da estrutura, o edifício estudado sugere tratar-se de um edifício “Gaioleiro”, no entanto, face à semelhança construtiva destes com os edifícios e Pombalinos, surge a necessidade de evidenciar algumas das características particulares dos edifícios “Gaioleiros” através de textos da bibliografia dedicada a esta temática. Neste sentido, esta pesquisa pretende identificar pormenores característicos importantes e distintivos para a correcta definição do edifício estudado e, ainda, a caracterização particularizada de alguns dos elementos mais relevantes para desenvolvimento do presente trabalho, como as janelas e pavimento.

A ventilação nos espaços interiores, por vezes desvalorizada, é um importante factor no nosso bem-estar reflectindo-se através da regulação de todos os parâmetros de conforto (temperatura, humidade, qualidade do ar, etc.). Deste modo, são descritos as principais características da permeabilidade ao ar dos edifícios, os mecanismos de ventilação natural e os principais sistemas e configurações de ventilação.

Os métodos de ensaio utilizados na caracterização do sistema de ventilação (ensaio de pressurização e de gás traçador) e que constituem a base experimental do presente trabalho, são descritos de acordo com a respectiva normalização. A pesquisa desta matéria consistiu na tradução das normas e a sua correcta integração com os objectivos definidos para o presente trabalho, com fim à caracterização do sistema de ventilação da habitação estudada.

Os modelos de estimativa dos caudais de ventilação, apresentados superficialmente, evidenciam a diversidade de modelos e de investigações elaboradas ao longo dos anos na área da ventilação. Estes modelos pretendem traduzir os efeitos dos mecanismos de ventilação (vento e temperatura) e estimar, de forma simplificada, o caudal de ventilação para diferentes configurações do sistema de ventilação natural. A avaliação de medidas de melhoria do sistema de ventilação, proposto neste trabalho, tem como base um dos modelos apresentados.

## **2.2. EDIFÍCIOS “GAIOLEIROS”**

### **2.2.1. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO**

A tipologia estrutural dos edifícios Pombalinos e “Gaioleiros” surge na sequência do sismo de 1 de Novembro de 1755, atingindo maiores proporções no litoral do Algarve e graves danos na cidade de Lisboa pelo colapso de grande parte do edificado, nomeadamente na zona da actual Baixa Pombalina. Na sequência do sismo, outros acontecimentos completaram o cenário de destruição como um maremoto e prolongados incêndios. Até então os edifícios, maioritariamente de qualidade inferior e com estrutura em alvenaria de taipa, não integravam qualquer resistência à acção sísmica ou elementos de travamento, e, apesar da ocorrência de alguns sismos durante o século XVI, as novas construções também não apresentavam defesas ou resistência a estas acções. O impacto do sismo de 1755 foi profundo e marcante na sociedade portuguesa pela necessidade de reerguer a capital de Portugal, uma das mais importantes cidades do continente europeu, mas também o foi na cultura e filosofia europeia. O processo de reconstrução, sendo uma prioridade imediata, envolveu quase dois terços da cidade de Lisboa. No entanto, é um importante marco no desenvolvimento tecnológico e científico, como o início da engenharia urbanística e a conversão da construção civil de uma escala artesanal para a escala pré-industrial e de maior especialização. Esta conversão resulta, por exemplo, na utilização de pré-fabricados em grande escala e a utilização de tecnologia anti-sísmica [9].

Dada a dimensão do projecto de reedificação da cidade de Lisboa, foi rapidamente delineado e criado um plano urbanístico normalizado com fim à uniformidade, coerência e equilíbrio do novo espaço urbano. Neste plano são estabelecidas as directrizes para uma reedificação normalizada desde do subsolo até ao desenho das fachadas, evitando a reconstrução ilegal e desorganizada. Entre as várias instruções que o integravam, consta a hierarquização de vias com traçado geométrico ortogonal, definição de processos de construção, tipologias dos edifícios, altura dos edifícios em função da largura das ruas e sistema de esgotos.

O plano urbanístico imposto pelo Marquês de Pombal, ministro do Rei de Portugal D. José I, teve a participação dos arquitectos e engenheiros militares Manuel da Maia, Eugénio dos Santos e Carlos Mardel. Este plano era de implementação obrigatória e aplicado a todas as obras, públicas ou privadas, com excepção para igrejas sendo permitido determinadas inovações.

Inicialmente, por proposta de Manuel da Maia, encontrava-se prevista para o edificado a reconstruir, uma tipologia de dois pisos elevados. Na versão final do plano, proposta de Carlos Mardel, foi elevado mais um piso elevado e ainda águas-furtadas na cobertura. Esta última proposta foi fundamentada pelo bom comportamento ao ensaio de acção sísmica de um modelo da estrutura tridimensional, a gaiola pombalina. Deste modo, a normalização dos edifícios permitiu de forma homogénea uma construção rápida, económica, moderna, de qualidade e, dada capacidade resistente à acção sísmica, segurança para os seus ocupantes.

### 2.2.2. TIPOLOGIA CONSTRUTIVA

Em seguida são descritos os elementos construtivos distintivos dos edifícios “Gaioleiros” e Pombalinos, particularizando a descrição dos elementos que, de forma directa ou indirecta, influenciam a permeabilidade ao ar da envolvente nos edifícios “Gaioleiros”.

Os edifícios designados “Gaioleiros” consistem numa variante informal das edificações Pombalinas, registando-se alterações significativas no processo construtivo ao longo do seu período, entre a década de 40 do século XIX e a década de trinta do século XX [10], Figura 2.1. A alteração mais significativa é a redução da qualidade de construção e do rigor de execução, em resultado do rápido e desregulado crescimento urbano que se registou nesse período. O aspecto mais relevante é a perda de capacidade resistente dos edifícios “Gaioleiro” (a principal característica nos Pombalinos) que actualmente é evidenciado pela maior degradação e fragilidade face aos edifícios Pombalinos. Outros aspectos que demonstram também a maior liberdade formal do período “Gaioleiro” são apresentados na Figura 2.2, como o aumento do número de pisos elevados, passando de três para quatro ou cinco pisos e aumento dos vãos das janelas.

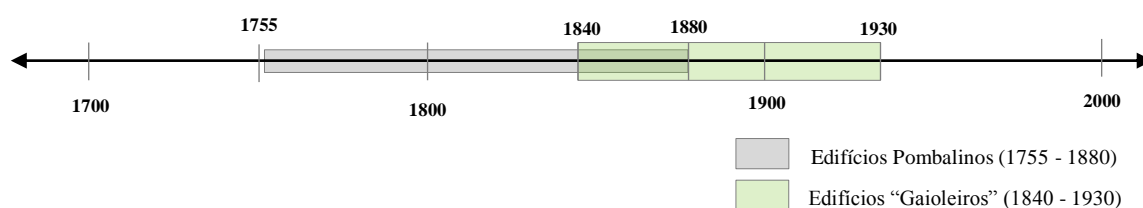


Figura 2.1 - Cronologia das tipologias construtivas Pombalina e “Gaioleiro”. Não estão representadas as tipologias anteriores e posteriores.

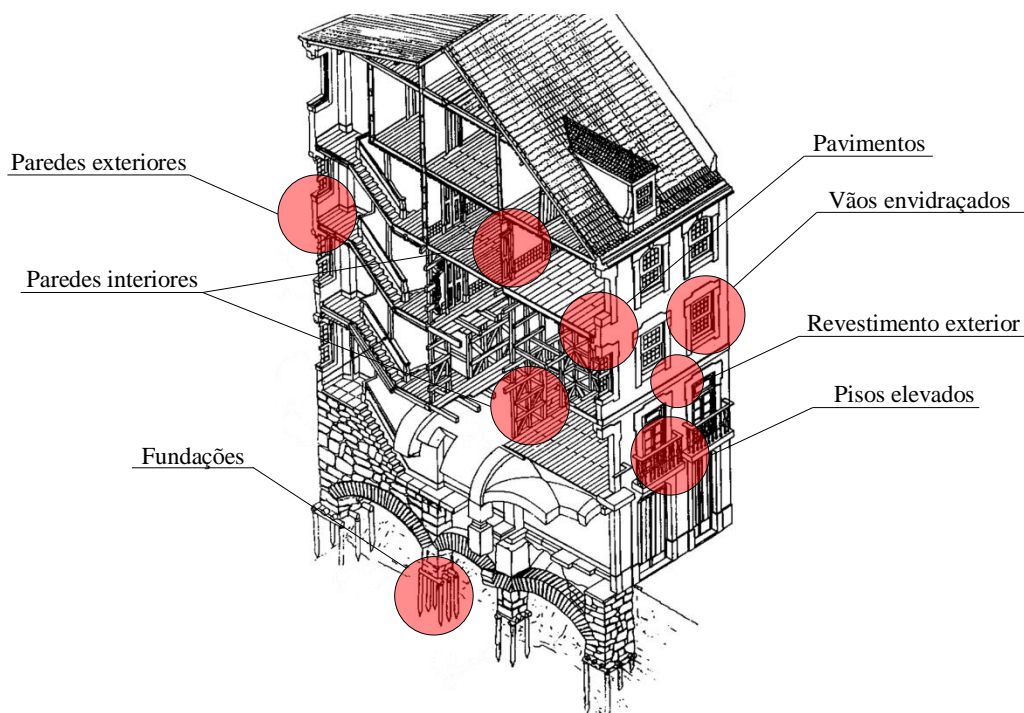


Figura 2.2 – Identificação dos principais elementos físicos e construtivos dos edifícios "Gaioleiros" diferenciadores dos edifícios Pombalinos. Adaptado de [11].

### *Principais elementos construtivos diferenciadores entre edifícios do tipo “Gaioleiro” e do tipo Pombalino*

#### *a) Fundações*

Uma das inovações nos edifícios Pombalinos é a introdução de estacas de madeira cravadas, constituindo um importante elemento de reforço da fundação e que permite a distribuição das cargas a camadas de terreno não superficial. O terreno superficial era essencialmente constituído por material pouco consolidado (escombros e entulho), no entanto a acção de cravação gerada conduz à consolidação parcial do solo e melhoria das suas características mecânicas.

Em resultado de escavações e prospecções realizadas a fundações de edifícios “Gaioleiro”, verifica-se a economia de alguns materiais utilizados nas suas fundações através da diminuição de secção e menor densidade dos elementos em madeira, nomeadamente as estacas. O assentamento diferencial é um óbvio efeito da menor resistência das fundações com efeitos em todo o edifício, como o abaulamento dos diversos pisos de madeira e, conseqüentemente, o aumento da permeabilidade ao ar da envolvente horizontal das fracções através do aumento das juntas entre os elementos de madeira e de fissuras.

#### *b) Paredes exteriores e revestimento*

As paredes exteriores, fachadas e empenas, que envolvem todo o edifício são formadas por alvenaria de pedra ordinária argamassada com cal aérea e de elementos cerâmicos aplicados de forma cuidada. A grande inércia destas paredes resulta da grande espessura e dos materiais empregues, permitindo maior estabilidade a cargas horizontais e verticais compensando a fraca resistência ao corte e tracção. A ligação destas paredes exteriores com a gaiola pombalina contribui ainda para estabilização global do edifício, formando uma estrutura de resistência tridimensional. As paredes têm espessuras aproximadas a um metro no rés-do-chão diminuindo de espessura em cada piso superior, mantendo as empenas a espessura de arranque.

Nos edifícios do tipo “Gaioleiro” as paredes exteriores são constituídas por alvenaria ordinária de pedra argamassada com argila e outros materiais de enchimento acondicionados de forma descuidada. Nas empenas e paredes de saguões é usual a alvenaria de tijolo maciço, Figura 2.4 a). A diminuição de espessura das paredes regista-se também nas empenas.

O revestimento e acabamento exterior dos Pombalinos é normalmente constituído por várias camadas de reboco de cal caldada e areia. As paredes exteriores eram acabadas com pintura de cal adicionando pigmentos claros para a coloração dos paramentos [12]. O período dos edifícios “Gaioleiros” é caracterizado pela incorporação de azulejos cerâmicos nas fachadas principais, como elemento de revestimento exterior. Em determinados edifícios nobres as fachadas são também decoradas com esculturas em pedra.

### c) Paredes interiores

A principal característica de um edifício tipo Pombalino é a estrutura tridimensional de madeira de elevado rigor construtivo, formando uma malha interligada que se assemelha a uma gaiola - gaiola pombalina. Estas estruturas foram concebidas com o objectivo de após um sismo de elevada magnitude manterem a sua integridade e capacidade de suporte, permitindo a protecção dos ocupantes e a sua saída em segurança. A gaiola pombalina é formada por um conjunto de componentes em madeira composto por paredes de frontal, pavimentos, cobertura, frechais e caixa de escadas que assentam num piso térreo estável e sólido (Figura 2.3 e Figura 2.5). Estes elementos têm um funcionamento combinado que assegura um bom comportamento estrutural de elevada estabilidade, flexibilidade e resistência às diversas acções. As dimensões dos vários elementos que compõem os vigamentos dos pisos, frontais, tabiques, entre outros, são estandardizadas, em resultado do conceito de pré-fabricação, tal como proposto pelo plano urbanístico de Marquês de Pombal.

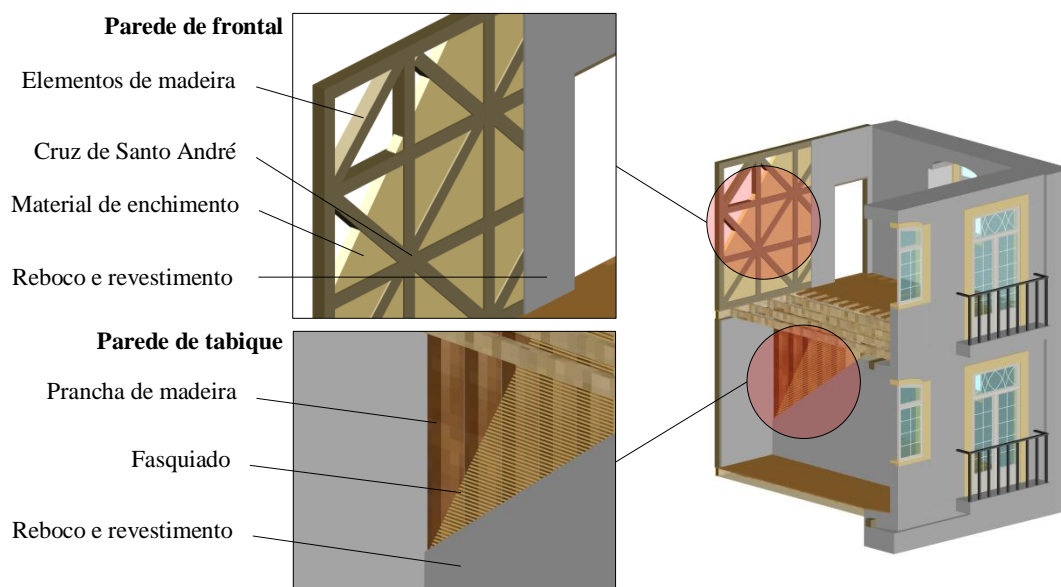


Figura 2.3 – Paredes interiores de frontal pombalino e de tabique.

Os frontais pombalinos, inicialmente designados por frontais tecidos, apresentam maior rigor e organização na sua construção relativamente aos até aí construídos. Com a estrutura interior de madeira em forma de cruz (designada cruz de Santo André) preenchida por diversos materiais de alvenaria, argamassa de cal, areia, pedra e fragmentos de tijolo, os frontais pombalinos compõem as paredes resistentes interiores dos edifícios pombalinos. A cruz de Santo André integra elementos verticais, horizontais e diagonais, que confere à armação boa ductilidade e grande capacidade na dissipação da energia sísmica.

Nos edifícios tipo “Gaioleiro” o frontal pombalino é caracterizado pela simplificação e economia dos materiais utilizados, recorrendo ao enchimento com materiais de entulho, diminuição da sec-

ção dos elementos de madeira, e ainda, a supressão de alguns componentes de solidarização horizontal. Estas são as particularidades que permitem usualmente desassociar os edifícios “Gaioleiros” dos Pombalinos.

As paredes de tabique (Figura 2.4 c) e d)) são, como os frontais, elementos de divisão do espaço interior, no entanto pela disposição e secção dos seus elementos de madeira não apresentam propriedades de resistência. Existem diversas tipologias de tabique sendo o mais utilizado nestas construções o tabique em prancha, composto por tábuas fixas ao vigamento do piso e tecto e de um fasquiado para aderência do acabamento em reboco. Nos “Gaioleiros” estes elementos predominam e, em determinadas situações, substituem em parte as paredes de frontal, reduzindo a resistência global.

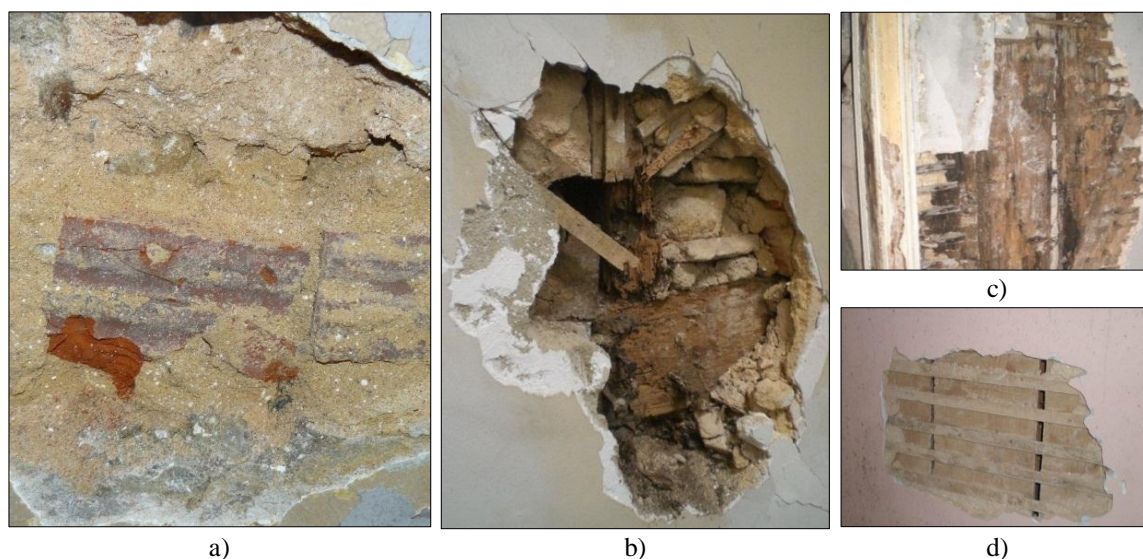


Figura 2.4 - Paredes exteriores e interiores do edifício estudado. a) Alvenaria de tijolo maciço numa parede de empena, sem disposição definida. b) Parede de frontal pombalino com preenchimento descuidado recorrendo a materiais diversos. c) Parede de tabique, servindo de divisão entre o espaço o interior da habitação e a caixa de escadas. d) Parede de tabique, divisão interior.

#### *d) Pavimentos*

Nos pisos elevados, os pavimentos são formados por vigamentos de madeira com direcção perpendicular à fachada principal integrando-se na gaiola através do apoio em frechais, Figura 2.5. Os frechais são elementos em madeira colocados no topo dos frontais pombalinos e incorporados na alvenaria das paredes exteriores (fachadas e empenas), tendo como função de apoio e de descarga dos vigamentos, Figura 2.6 b). Os tarugos complementam o travamento das vigas, tornando os pavimentos num elemento de resistência às acções horizontais e de grande importância na estrutura tridimensional da gaiola pombalina.

Nos “Gaioleiros” é frequente os vigamentos assentarem directamente nas paredes de alvenaria, abandonando uma das características de estabilidade dos edifícios Pombalinos. Neste sentido, a menor solidez dos pavimentos pode conduzir ao assentamento diferencial e ao aumento da per-

meabilidade ao ar, resultando em fissuras entre os elementos do soalho e na ligação entre pavimento e paredes, tal como é visível na Figura 2.6 c).

O pé-direito e o número de pisos dos edifícios Pombalinos é função das ruas principais, não ultrapassando em altura a largura da rua. Neste sentido, e de acordo com as directrizes definidas no plano urbanístico pós-terramoto 1755 para a reedificação da cidade, os edifícios Pombalinos apresentam um pé-direito entre 3,0 e 4,5 m e no máximo 4 pisos com aproveitamento das águas-furtadas para habitação. A maior liberdade formal patente nos edifícios “Gaioleiros” conduziu à alteração de alguns traços descritos anteriormente. O aumento do número de pisos é umas das principais características físicas distinguíveis dos “Gaioleiros”, atingindo 5 ou 6 pisos com um pé-direito típico de 3,0 m.

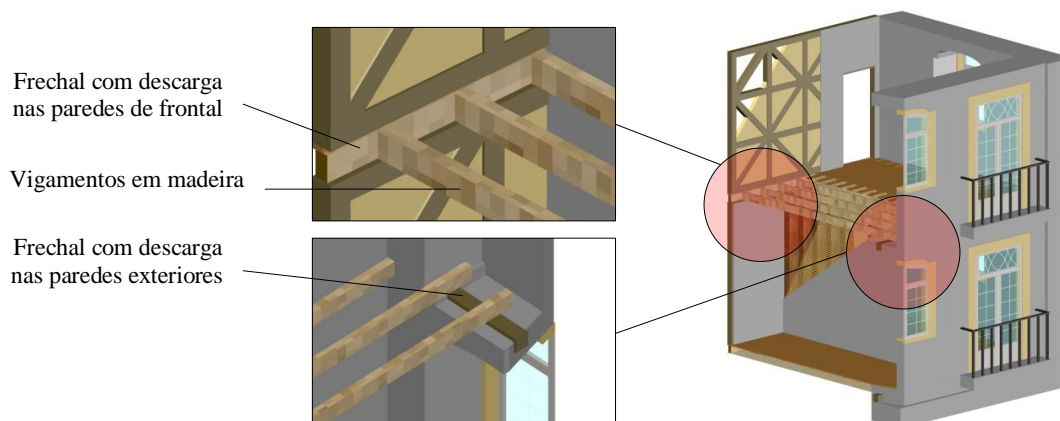


Figura 2.5 - Frechais de apoio aos vigamentos do pavimento e a descarga nas paredes de frontal (interiores) e paredes exteriores.

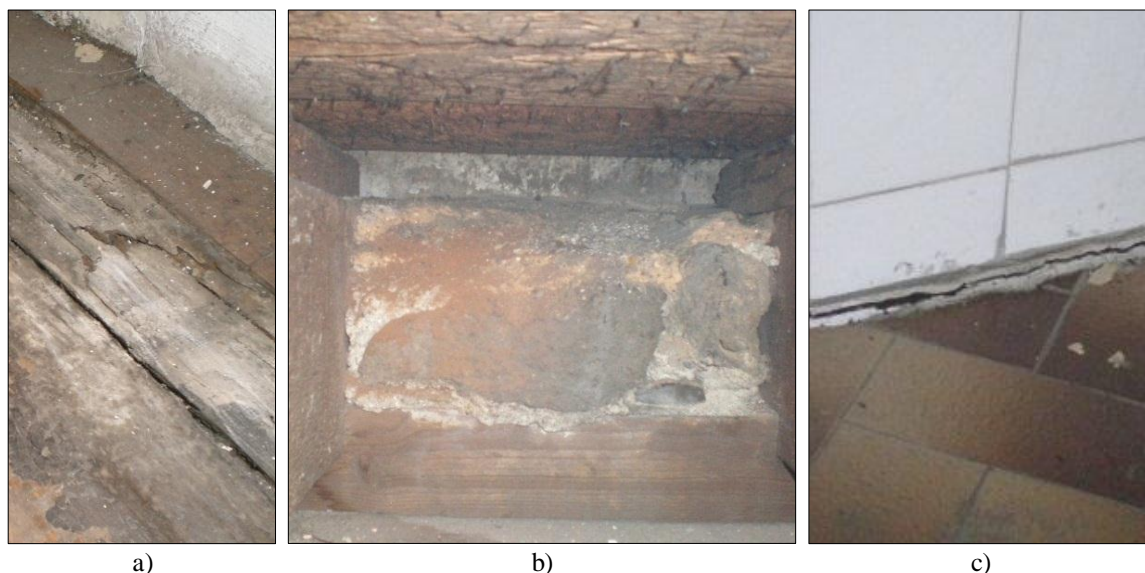


Figura 2.6 – Pavimento do edifício estudado. a) Frinchas entre elementos do soalho. b) Apoio dos vigamentos do pavimento sobre um frechal com descarga na parede exterior. c) Frincha na ligação entre o pavimento e a parede interior, devido ao assentamento do pavimento.

*e) Vãos envidraçados*

A composição das fachadas nos edifícios Pombalinos seguia regras construtivas específicas com fim à normalização e equilíbrio dos edifícios com o restante espaço urbano, sendo definidas as dimensões dos vãos das janelas e a sua disposição ao longo da fachada. Normalmente as fachadas dos Pombalinos são compostas por janelas de sacada nos primeiros pisos e janelas de peito nos restantes. Nos “Gaioleiros” a dimensão das janelas e dos vãos é superior, sendo utilizados simultaneamente janelas de peito e de sacada no mesmo piso. Tipicamente as janelas de peito encontram-se a 0,90 m do pavimento com dimensões 1,35x1,10 m<sup>2</sup> (com fixo superior de 1,35x0,50 m<sup>2</sup>) e janelas de sacada com dimensões 1,35x2,00 m<sup>2</sup> (com fixo superior de 1,35x0,50 m<sup>2</sup>). Estes valores são referentes ao edifício estudado, que na generalidade é representativo deste tipo de edificado. Os envidraçados são constituídos vários elementos de vidro simples de reduzidas dimensões fixos a quadrículas de madeira com massa de vidreiro.

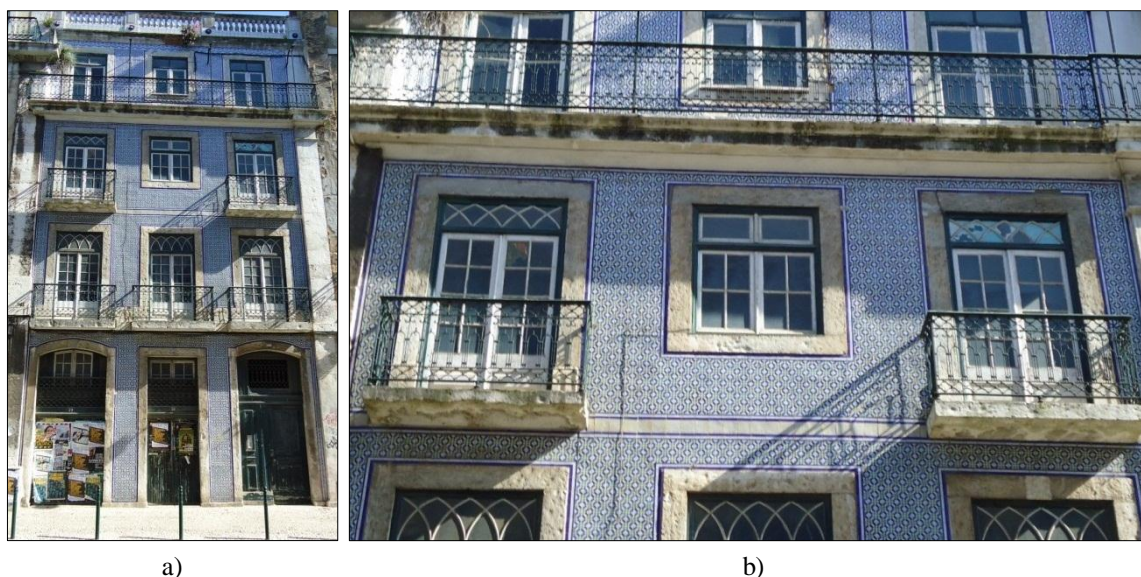


Figura 2.7 – Vista exterior do edifício estudado. a) Fachada principal. b) Janelas de sacada e de peito no mesmo piso.

Segundo a *Planta da Cidade de Lisboa e Belém*, com levantamento topográfico datado de 1807, este local era ocupado pela margem do rio Tejo, confirmado no levantamento arqueológico realizado ao edifício estudado e adjacentes através de poços geotécnicos [13]. Consultou-se também a *Carta Topográfica de Lisboa*, datada de 1856, onde se regista a presença do edifício estudado. Neste sentido, através destes levantamentos admite-se que a construção do edifício estudado data do séc. XIX, situando-se entre 1807 e 1856, Figura 2.8.

Através das descrições dos diversos elementos e características construtivas referentes aos edifícios Pombalinos e “Gaioleiros”, denota-se que o edifício estudado enquadra-se no período de transição entre estas duas tipologias. O edifício integra diversas características construtivas destes dois períodos, como a constituição das paredes de frontal e a informalidade da fachada semelhan-

te aos “Gaioleiros” e o igual número de pisos dos Pombalinos. Neste sentido, admite-se que a tipologia estrutural é “Gaioleiro” e com construção entre 1840 e 1860 (fase inicial da construção dos edifício “Gaioleiros”).

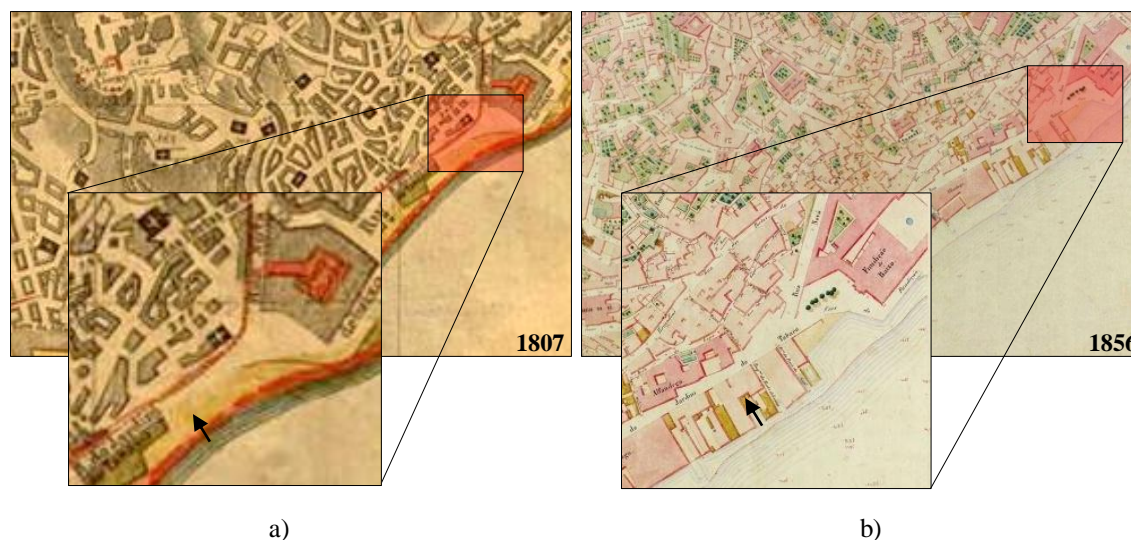


Figura 2.8 – Comparação entre levantamentos topográficos da zona do edifício estudado, datados de 1807 e 1856. a) Inexistência do edifício estudado em 1807, Planta da Cidade de Lisboa e Belém. b) Edifício estudado em 1856, Carta Topográfica de Lisboa.

### 2.2.3. SISTEMA DE VENTILAÇÃO DOS EDIFÍCIOS “GAIOLEIROS”

O sistema de ventilação dos edifícios “Gaioleiros” é baseado na ventilação cruzada com admissão natural através das frinchas na envolvente e por exaustão natural pela conduta de chaminé do fogão, à semelhança da maioria dos edifícios antigos. A renovação do ar interior pode ser intensificada pela abertura de janelas.

Os compartimentos de serviços, cozinha e instalação sanitária, têm fundamentalmente uma função de exaustão do ar na ventilação natural através da chaminé e uma janela de reduzida dimensão, respectivamente. A principal característica da chaminé nestes edifícios antigos é a grande secção, tipicamente  $0,25 \times 1,00 \text{ m}^2$ , conferindo uma elevada capacidade de exaustão e influência no sistema de ventilação.

Relativamente às janelas, um dos componentes com maior preponderância na permeabilidade ao ar da envolvente, são de sacada e de peito com caixilharia em madeira maciça, Figura 2.9 a) e b). O tipo de abertura das janelas é usualmente de batente com um fixo no topo e um mecanismo de fecho tipo cremona (Figura 2.9 c)), podendo encontrar-se também janelas de guilhotina apenas para a comunicação entre compartimentos e espaços secundários (saguões e ruas secundárias). As juntas dos elementos móveis das janelas não têm qualquer vedante, assim como nas frinchas das janelas de sacada com a pedra de soleira. Nesta última situação é usual os ocupantes utilizarem um rolo de pano, preenchido com areia (vulgo, “chouriço”) com fim de reduzir a permeabilidade das janelas de sacada (permeabilidade acentuada pela ausência de perfil de soleira e pela normal degradação da madeira nesta zona da janela). O envidraçado é composto por vários elementos de

vidro simples fixos a quadrículas de madeira com massa de vidreiro, não se prevendo infiltrações de ar significativas através deste elementos, Figura 2.9 b).

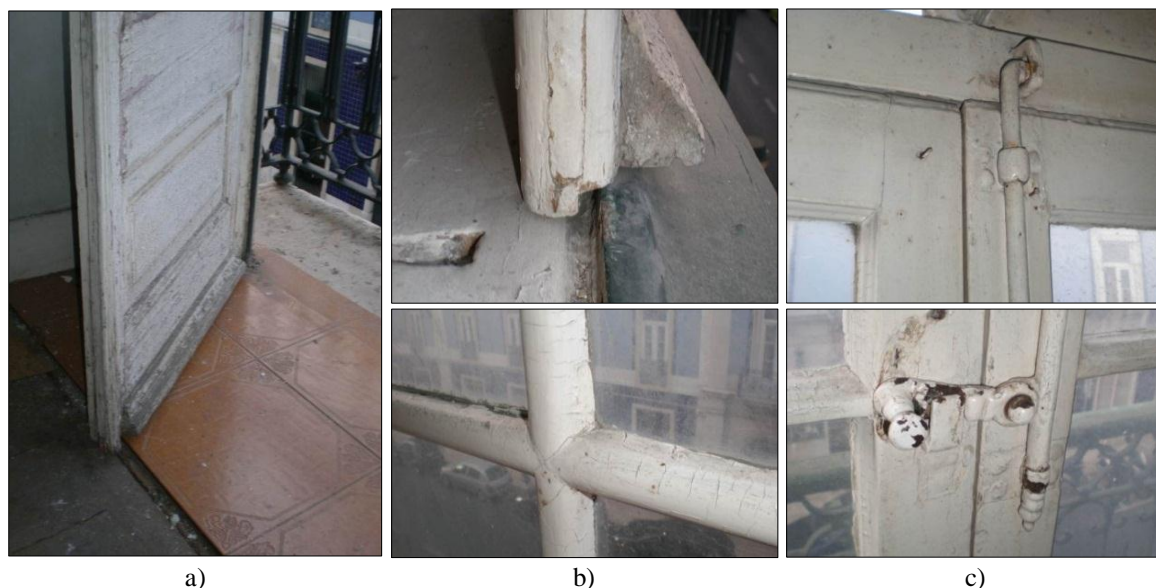


Figura 2.9 - Vãos envidraçados do edifício estudado. a) Janelas de sacada sem perfil de soleira. b) Pormenor da junta móvel das janelas de peito e quadrícula dos vidros. c) Mecanismo de fecho tipo cremona presente nas janelas de sacada e de peito.

As portas interiores são elementos importantes no correcto funcionamento da ventilação cruzada e devem permitir a circulação do ar no interior da habitação através de frinchas (principalmente pela frincha junto ao pavimento) ou de outras aberturas. Nestes edifícios, em geral, estes elementos apresentam uma elevada permeabilidade ao ar, garantindo a devida passagem de ar.

À data de construção dos edifícios Pombalinos e “Gaioleiros” não eram previstos sistemas de aquecimento de águas sanitária (através de esquentador ou caldeira) nem de aquecimento do ar interior (através de lareira ou aquecimento centralizado), a eventual existência de algum destes sistemas é resultado da modernização e da adaptação das habitações às actuais exigências de conforto (com ou sem conformidade regulamentar). A existência de eventuais mecanismos de ventilação associados a estes sistemas de aquecimento, tais como exaustores e ventiladores, podem alterar significativamente o comportamento do sistema de ventilação natural.

## 2.3. VENTILAÇÃO

### 2.3.1. ENQUADRAMENTO

O ar, sendo uma importante parte na nossa vida quotidiana, raramente é considerado como um dos elementos essenciais para o nosso bem-estar. Usualmente as principais preocupações com a saúde e bem-estar das pessoas envolvem a alimentação equilibrada, qualidade da água de consu-

mo, temperatura interior adequada, entre outros. No entanto, não é frequente a preocupação com a qualidade do ar que se respira.

De facto, o Homem passa maior parte do seu tempo, quase 90%, em espaços interiores como escritórios, habitações e escolas. Neste sentido é necessário uma maior consciencialização da importância da qualidade do ar interior (QAI), e da implementação de medidas na sua melhoria e controlo. Na Figura 2.10 é apresentada a exposição do Homem a diversos contaminantes em vários locais do dia-a-dia.

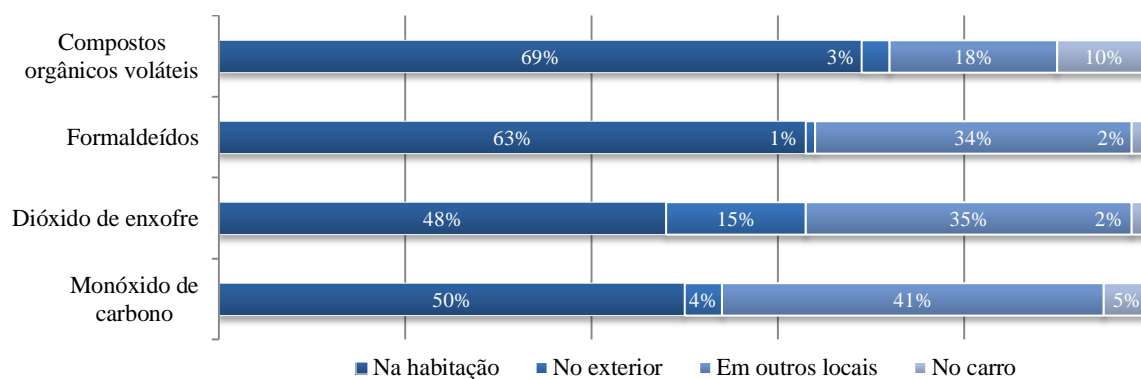


Figura 2.10 - Exposição média do Homem a alguns contaminantes (%) em diversos locais do dia-a-dia. Adaptado de [14].

A consciencialização ecológica e a implementação de medidas na redução do consumo de energia, com início na década de 70 do século passado, tiveram como resultado a melhoria significativa do comportamento térmico dos edifícios, no entanto, em alguns casos o aumento da estanqueidade ao ar de algumas medidas conduziram à insuficiente qualidade do ar interior. Neste sentido, nos últimos quarenta anos, a temática da ventilação sofreu diversos desenvolvimentos com fim ao conhecimento dos mecanismos de ventilação e correcto enquadramento com as medidas de eficiência energética.

Em resultado deste progresso, novas normas de ventilação e orientações foram criadas reflectindo a importância da ventilação na qualidade do ar e ambiente interior [15].

O processo de renovação do ar, através da ventilação, tem como objectivo básico a exaustão do ar degradado (por elementos nocivos) e a admissão de “ar novo” em quantidade suficiente para o interior da habitação ou edifício. Os elementos nocivos têm diversas origens, sendo a mais frequente o aumento de concentração de químicos poluentes libertados no espaço interior por materiais, equipamentos e seres vivos.

A complexidade de um sistema de ventilação reside no balanço contínuo entre a exaustão e a admissão de ar em determinado compartimento, habitação ou edifício, que permita a redução da concentração de elementos poluentes garantindo a qualidade exigível do ar, fundamental para o bem-estar dos ocupantes, e ainda, de acordo com os requisitos de eficiência energética, Figura 2.11.

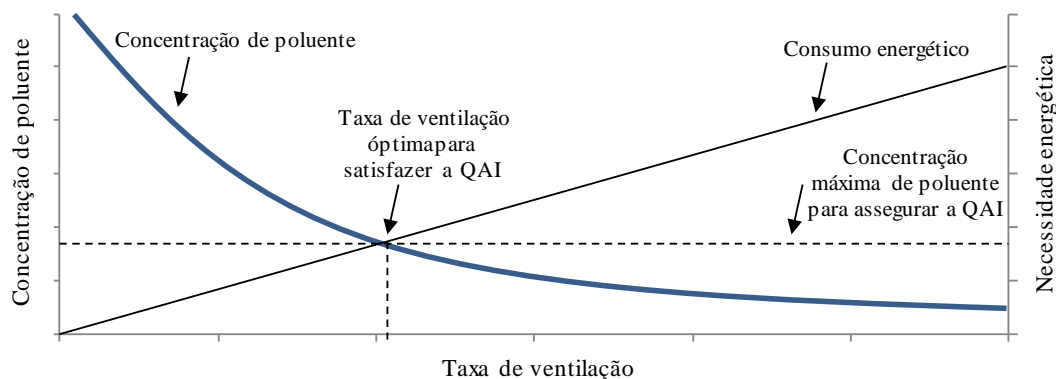


Figura 2.11 – Regulação do sistema de ventilação em função da qualidade do ar interior. Adaptado de [16].

### 2.3.2. CARACTERÍSTICAS DA PERMEABILIDADE AO AR DOS EDIFÍCIOS

A permeabilidade ao ar em edifícios, deve-se às aberturas na sua envolvente. O grau de influência das aberturas na permeabilidade depende, principalmente, da sua dimensão e localização, características do fluxo de ar gerado pela permeabilidade e, por fim, da diferença de pressão entre aberturas. A envolvente é composta pelos elementos físicos de separação entre o ambiente interior e exterior (espaços úteis e não úteis), como as fachadas. Outros elementos de fronteira entre fracções autónomas adjacentes, como tectos e pavimentos, são também considerados envolvente.

As janelas, portas e outros componentes presentes na envolvente, são usualmente designados por aberturas mas, na temática agora abordada da permeabilidade, não são considerados como aberturas dado que na maioria do tempo encontram-se encerradas. Nestes elementos apenas as juntas móveis e, eventualmente, dispositivos de ventilação são considerados no estudo da permeabilidade ao ar.

Em Portugal, a tipologia construtiva do edificado novo assenta numa estrutura de betão armado com pavimentos em laje maciça. Estes pavimentos apresentam uma permeabilidade muito reduzida, contrariamente aos pavimentos em madeira que predominam nas construções até, aproximadamente, à década de 30 do século passado. De facto, a permeabilidade entre pisos pode constituir uma parte significativa da permeabilidade global ao ar dos edifícios antigos, resultado, por exemplo, da degradação e abaulamento do vigamento em madeira dos pavimentos. No entanto, em pavimentos não degradados e dada a reduzida diferença de pressão interior entre as habitações, não são gerados caudais de ar significativos.

#### a) Aberturas

São consideradas aberturas, as frinchas de grande dimensão, grelhas ou condutas com área livre relativamente grande. Para pressões normalmente geradas pelos mecanismos de ventilação (entre 0 e 5 Pa), o escoamento do ar tem um regime turbulento e o seu caudal, quantidade de ar que atra-

vessa a abertura, é determinado pela expressão de caudal através de um orifício [15], expressão (2.1):

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_0}} \quad (2.1)$$

sendo,  $Q$  = caudal escoado através da abertura ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ );  $C_d$  = coeficiente de descarga da abertura;  $A$  = área da abertura ( $\text{m}^2$ );  $\Delta p$  = diferença de pressão entre o espaço interior e exterior dividido pela abertura (Pa);  $\rho_0$  = densidade do ar à temperatura e pressão de referência,  $T_0$  e  $p_0$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

De acordo com algumas normas internacionais, nomeadamente a BS 5925:1991 [17], a expressão anterior deve ser aplicada em situações onde a abertura apresente dimensão superior a 10 mm, devido à variação na geometria das aberturas e pressões envolvidas que afectam o coeficiente de descarga da abertura,  $C_d$ .

Os ensaios de pressurização (ver Secção 2.4.2) permitem determinar, de forma concreta, a área efectiva de permeabilidade ao ar da envolvente,  $C_d \cdot A$ , de um compartimento ou habitação.

#### b) Frinchas

Denominam-se por frinchas, as fissuras ou juntas estreitas e que atravessem o elemento da envolvente. O escoamento do ar tem um regime, essencialmente, laminar, determinando o caudal de ar que transpõe a abertura através da expressão (2.2):

$$Q = \frac{b \cdot h^3}{12 \cdot \mu \cdot L} \cdot \Delta p \quad (2.2)$$

sendo,  $b$  = comprimento da abertura (m);  $h$  = altura da abertura (m);  $L$  = profundidade da abertura (m)  $\mu$  = viscosidade absoluta do ar ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ );  $\Delta p$  = diferença de pressão entre o espaço interior e exterior dividido pela abertura (Pa).

Para fissuras de maior dimensão, a permeabilidade apresenta um regime transitório entre o laminar e turbulento. A simplificação da expressão anterior, através do coeficiente de permeabilidade ( $C$ ), permite maior exactidão no cálculo, sendo utilizada com maior propriedade em frinchas ou juntas de janelas, portas e outros elementos semelhantes, expressão (2.3):

$$Q = C \cdot L \cdot (\Delta p)^n \quad (2.3)$$

sendo,  $Q$  = caudal de ar escoado através da abertura ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $C$  = coeficiente de escoamento em função da geometria da abertura ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ );  $L$  = comprimento da abertura (m);  $\Delta p$  = diferença de pressão entre o espaço interior e exterior dividido pela abertura (Pa);  $n$  = expoente do escoamento (-). O expoente  $n$  assume o valor de 0,5 para regimes turbulentos (frinchas de pequena

dimensão) e 1,0 para regimes laminares (aberturas de grande dimensão). Face ao regime transitório entre laminar e turbulento adopta-se, para  $n$ , o valor de 0,67 que melhor traduz o fenómeno.

Em Portugal, as caixilharias de vãos envidraçados e portas, que fazem parte da envolvente, são obrigatoriamente sujeitas a ensaios em laboratórios acreditados sob condições normalizadas, com os quais se quantificam várias características, podendo-se referir entre outras, a permeabilidade ao ar e à água. Relativamente à permeabilidade ao ar, estes ensaios permitem obter dados específicos e pormenorizados, classificando-se os vãos envidraçados e portas em quatro classes segundo a área total do elemento e ou comprimento das juntas móveis, Quadro 2.1. De referir que esta classificação resulta de ensaios com pressões de referência entre 150 e 600 Pa, valores díspares dos naturalmente gerados e que podem não expressar o verdadeiro comporta e interacção com outros componentes da habitação ou edifício.

Quadro 2.1 - Permeabilidade ao ar a 100 Pa, segundo a área total do elemento e ou comprimento das juntas móveis, para as classes 1 a 4 de vãos envidraçados e portas. Adaptado de [18].

Classe	Permeabilidade ao ar a 100 Pa ( $Q_{100 \text{ Classe } i}$ )		Pressão de ensaio (Pa)
	Segundo área total do elemento ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2$ )	Segundo comprimento das juntas móveis ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}$ )	
0	-	-	Sem ensaio
1	50	12,50	150
2	27	6,75	300
3	9	2,25	600
4	3	0,75	600

A classe de permeabilidade ao ar da caixilharia de janelas e portas por ser estimada através de ensaios experimentais de pressurização (ver Subcapítulo 4.2), a partir da subtracção dos caudais de ar entre a situação inicial (janelas na condição normal) e uma segunda situação, em que as juntas e frinchas das caixilharias se encontram vedadas. Nestes ensaios é usual serem aplicadas diferenças de pressão entre 25 e 60 Pa, não alcançando as pressões normalizadas dos ensaios de classificação em laboratório (150 a 600 Pa). Deste modo, a expressão (2.4) permite “converter” os limites das classes de permeabilidade ao ar para pressões inferiores ao definido no Quadro 2.1, usualmente para pressões de 50 Pa:

$$Q_{50 \text{ Classe } i} = \frac{Q_{100 \text{ Classe } i}}{100^{0,67}} \cdot 50^{0,67} \quad (2.4)$$

sendo,  $Q_{50 \text{ Classe } i}$  = permeabilidade das janelas ao ar a 50 Pa de acordo com a respectiva classe ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2$  ou  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}$ );  $Q_{100 \text{ Classe } i}$  = permeabilidade das janelas ao ar a 100 Pa ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2$  ou  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}$ ).

No Quadro 2.2 são apresentados os valores definidos pela expressão (2.4). Com este quadro é possível determinar a classe de permeabilidade ao ar das janelas tendo por base o valor experimental  $Q_{50}$  dos ensaios de pressurização.

Quadro 2.2 - Permeabilidade ao ar a 50 Pa, segundo a área total do elemento e ou comprimento das juntas móveis, para as classes 1 a 4 de vãos envidraçados e portas.

Classe	Permeabilidade ao ar a 50 Pa ( $Q_{50}$ Classe $i$ )	
	Segundo área total do elemento ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2$ )	Segundo comprimento das juntas móveis ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}$ )
0	-	-
1	31,43	7,86
2	17,97	4,24
3	5,66	1,41
4	1,89	0,47

### 2.3.3. MECANISMOS DE VENTILAÇÃO NATURAL

O conhecimento do comportamento predominante dos mecanismos de ventilação (temperatura e vento) que ocorre em determinado local, permite avaliar e definir, em benefício para o correcto funcionamento dos sistemas de ventilação, as características e disposição de aberturas, orientação das fachadas, configuração dos sistemas de ventilação, entre outros.

#### a) Acção do vento

O vento é a componente de maior influência nos mecanismos de ventilação natural. O escoamento do vento junto à superfície terrestre é um fenómeno complexo e turbulento, composto por inúmeras variáveis como a rotação da Terra, diferenças de temperatura do ar entre oceanos e continentes e entre as zonas polares e as tropicais, localização geográfica e topográfica. A variação diária e sazonal das condições do clima, como temperatura do ar, direcção e velocidade do vento, entre outros fenómenos pode ser analisada segundo diferentes escalas, enquadrando a dimensão das variáveis e dos seus efeitos [15]. Para o presente trabalho, o aspecto mais relevante é a velocidade e direcção do vento que incide sobre a superfície e edifícios e o seu efeito na ventilação natural. Este é influenciado sobretudo pela força de atrito que a superfície exerce sobre escoamento do ar, com intensidade exponencialmente decrescente com a distância ao solo. Esta perturbação sobre a direcção e intensidade do vento ocorre numa faixa designada por camada limite atmosférica (CLA) e que define a fronteira entre a zona livre da atmosfera, predominando o escoamento laminar, e a zona sob os efeitos perturbadores dos edifícios e relevo do terreno.

A ventilação de uma habitação é afectada pela distribuição da pressão em torno da sua envolvente exterior, nomeadamente sobre as aberturas presentes. A pressão do vento sobre uma superfície, neste caso sobre as fachadas e cobertura dos edifícios, é dada pela expressão (2.5).

$$p_w = 0,5 \cdot C_p \cdot \rho_0 \cdot v^2 \quad (2.5)$$

sendo,  $p_w$  = pressão do vento sobre determinado ponto da superfície do edifício (Pa);  $C_p$  = coeficiente de pressão pela acção do vento (-);  $\rho_0$  = densidade do ar à temperatura e pressão de referência,  $T_0$  e  $p_0$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $v$  = velocidade do vento a determinada altura ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

O vento directamente incidente sobre uma superfície, como as fachadas de um edifício, é expresso por coeficientes de pressão positivos, ou seja, a pressão criada é superior à pressão estática do vento em resultado do impacto e desvio na superfície. Ao contrário, os coeficientes negativos exprimem as pressões negativas junto à superfície da fachada oposta à direcção do vento, ou seja, a pressão é inferior à pressão estática do vento devido às arestas vivas formadas pela cobertura e fachada. O coeficiente de pressão pela acção do vento é determinado pela expressão (2.6).

$$C_p = \frac{p - p_0}{0,5 \rho_0 v^2} \quad (2.6)$$

sendo,  $C_p$  = coeficiente de pressão pela acção do vento (-);  $p$  = pressão estática em determinado ponto da superfície (Pa);  $p_0$  = pressão estática de referência, pressão atmosférica (Pa);  $\rho_0$  = densidade do ar à temperatura e pressão de referência,  $T_0$  e  $p_0$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $v$  = velocidade do vento a determinada altura do solo ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Na Figura 2.12 observa-se esquematicamente a distribuição de pressões nas fachadas e cobertura, gerada pelo vento directamente incidente numa das fachadas, em edifícios isolados de planta quadrada.

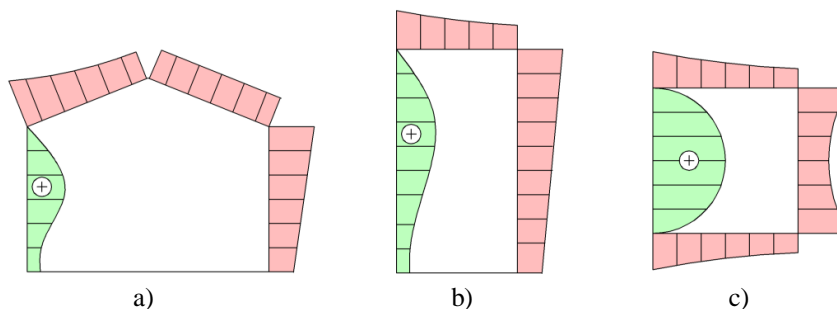


Figura 2.12 - Distribuição do coeficiente de pressão pela acção do vento. a) Edifício com baixo perfil e cobertura inclinada (alçado). b) Edifício com alto perfil e cobertura em terraço (alçado). c) Edifício isolado de planta quadrada (planta). Adaptado de [15].

Nos diversos regulamentos e normas, são usualmente definidos valores de  $C_p$  para edifícios isolados de planta quadrada em função da altura do edifício, nível de protecção do edifício ao vento e inclinação da cobertura. No entanto, como o valor de  $C_p$  é variável com as diferentes direcções de vento e geometrias dos edifícios, a bibliografia mencionada anteriormente tem uma abordagem simplista e limitada, e que em muitos casos não traduz os fenómenos realmente envolvidos. No Quadro 2.3 são apresentados os coeficientes de pressão pela acção do vento a adoptar segundo a norma EN 15242:2007 [8].

Quadro 2.3 - Coeficientes de pressão pela acção do vento sobre uma superfície. Adaptado de [8].

Parte da fachada	Nível de protecção	Coeficientes de pressão ( $C_p$ )				
		Vento incidente ( $C_{p1}$ )	Vento não incidente ( $C_{p2}$ )	Cobertura ( $C_{p3}$ )		
				< 10°	10° ~ 30°	> 30°
Inferior (0-15m)	Aberto	+0,50	-0,70	-0,70	-0,60	-0,20
	Normal	+0,25	-0,50	-0,60	-0,50	-0,20
	Protegido	+0,05	-0,30	-0,50	-0,40	-0,20
Intermédia (15-50m)	Aberto	+0,65	-0,70	-0,70	-0,60	-0,20
	Normal	+0,45	-0,50	-0,60	-0,50	-0,20
	Protegido	+0,25	-0,30	-0,50	-0,40	-0,20
Superior (> 50m)	Aberto	+0,80	-0,70	-0,70	-0,60	-0,20

O registo da velocidade e direcção do vento em determinada zona ou local podem ser adquiridos com recurso a equipamentos de monitorização instalados no local ou, através da extrapolação, de dados registados em estações meteorológicas próximas. Esta última situação, com maior particularidade nas zonas urbanas, conduz ao menor rigor dos valores da velocidade do vento extrapolados. Na cidade de Lisboa existem várias estações meteorológicas com registos divulgados publicamente em diversos *websites* [19].

Segundo a norma EN 15242:2007 [8], a correcção da velocidade do vento é função da diferença de rugosidade do terreno entre a estação meteorológica e o local pretendido, definida na seguinte expressão logarítmica:

$$v_2 = v_1 \cdot \frac{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)} \quad (2.7)$$

sendo,  $v_1$  e  $v_2$  = velocidade registada na estação meteorológica e no local de ensaio, respectivamente ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $h_1$  e  $h_2$  = altura ao solo dos pontos de registo na estação meteorológica e no local de ensaio, respectivamente (m);  $z_0$  = rugosidade do terreno no local de ensaio (m), Quadro 2.4.

Quadro 2.4 – Rugosidade de diferentes tipos de superfície.

Tipo de superfície	$z_0$ (m)
Livre	0,03
Rural	0,25
Urbano	0,50
Cidade	2,0 – 4,0

A aplicação desta expressão é limitada às seguintes condições:  $v_1 > 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e  $h_1 > 20\cdot z_0$ . Ou seja, para a altura referência de registo da estação meteorológica (10 m) e para zonas com rugosidade elevada ( $z_0 \geq 0,5$  m, densidade urbana média a elevada), a expressão (2.7) não permite estimar convenientemente a velocidade do vento no local de ensaio ( $v_2$ ).

Outro método de correcção da velocidade do vento é composto pelas seguintes etapas:

- “elevação” do valor da velocidade do vento (registado na estação meteorologia) acima da camada limite atmosférica (CLA);

- “transporte” do valor da velocidade do vento desde da estação até ao edifício (sempre acima da CLA), e;
- “descensão” do valor da velocidade do vento acima da CLA até à cota pretendida.

A “elevação” do valor da velocidade do vento é função da espessura da camada limite atmosférica e do expoente do perfil de velocidade do vento (característico do tipo de superfície). A velocidade do vento acima da CLA é idêntica em ambos os locais (estação e edifício), possibilitando “transportar” o valor da estação até ao edifício, independentemente da distância entre estes. A velocidade do vento incidente no edifício à altura pretendida é determinada pela “descensão” do valor da velocidade de acordo com a espessura da camada limite e do expoente do perfil, Figura 2.13.

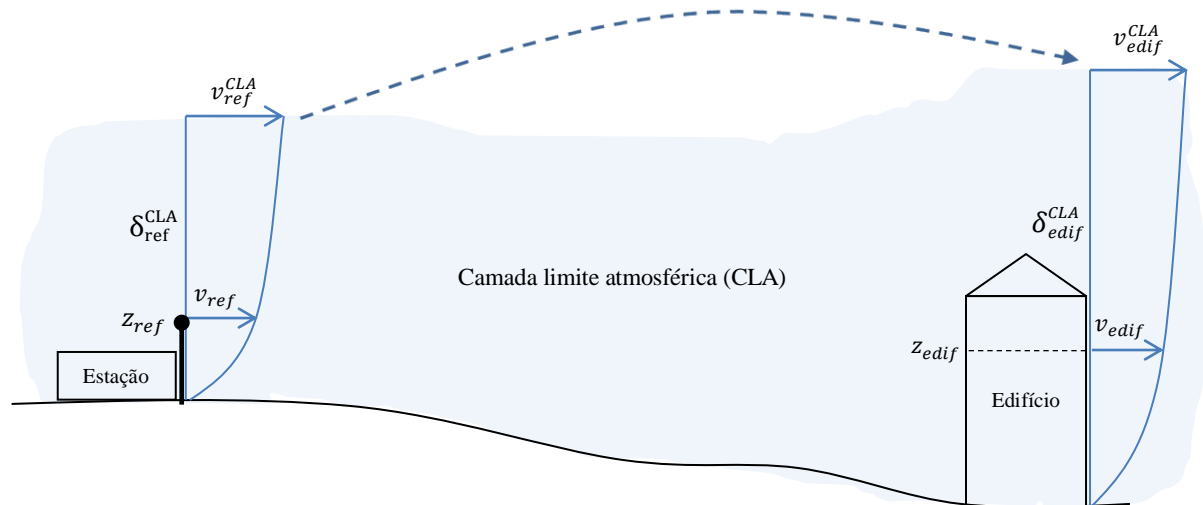


Figura 2.13 - Conversão dos valores de velocidade do vento registado em determinado local para outro. Adaptado de [29].

A velocidade do vento sobre o edifício à altura pretendida pode ser determinada pela expressão exponencial (2.8).

$$v_{edif} = v_{ref} \cdot \left( \frac{\delta_{ref}^{CLA}}{z_{ref}} \right)^{\alpha_{ref}} \cdot \left( \frac{z_{edif}}{\delta_{edif}^{CLA}} \right)^{\alpha_{edif}} \quad (2.8)$$

sendo,  $v_{edif}$  = velocidade estimada do vento sobre o edifício à altura pretendida ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $v_{ref}$  = velocidade registada ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );  $z_{ref}$  = altura de registo da velocidade do vento no local de referência, estação meteorológica (em geral 10 m) (m);  $\delta_{ref}^{CLA}$  = espessura da camada limite atmosférica (CLA) no local da estação (m);  $\delta_{edif}^{CLA}$  = espessura da CLA no local do edifício (m);  $z_{edif}$  = altura pretendida no edifício (m).  $v_{ref}^{CLA} = v_{edif}^{CLA}$  é a velocidade acima da CLA ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

### b) Gradiente térmico

O gradiente térmico, ou efeito de chaminé, consiste na circulação de massas de ar gerado pela diferença de temperatura de dois espaços e consequente diferença de densidade do ar nesses espaços. A menor densidade do ar quente permite a sua ascensão com a sequente substituição por

outra massa de ar de maior densidade, devido à diferença de pressão estática. Nas habitações, parte da ventilação resulta deste fenómeno, tendo esta maior expressão com o aumento da diferença térmica e distância entre aberturas. Em Portugal, a temperatura interior é, durante quase todo o ano, superior à temperatura exterior, permitindo a exaustão através de aberturas a níveis elevados e a admissão de ar a níveis inferiores. Nas situações em que a temperatura exterior é superior à interior o efeito inverte-se.

A diferença de pressão, gerada pelo efeito chaminé, entre duas aberturas, Figura 2.14 a), é determinada pela expressão (2.9):

$$\Delta p_s = -\rho_0 \cdot g \cdot h \cdot \left(1 - \frac{T_{ext}}{T_{int}}\right) \quad (2.9)$$

sendo,  $\Delta p_s$  = diferença de pressão entre duas aberturas (-);  $\rho_0$  = densidade do ar à temperatura e pressão de referência,  $T_0$  e  $p_0$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $g$  = aceleração da gravidade ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ );  $h$  = diferença de altura entre aberturas (m);  $T_{ext}$ ,  $T_{int}$  = temperatura exterior e interior (K).

Em edifícios que apresentem, no interior, zonas com diferentes temperaturas, o gradiente de pressão gerado pelo efeito chaminé entre duas aberturas, Figura 2.14 b), é determinado pela expressão (2.10).

$$\Delta p_s = -\rho_0 \cdot g \cdot (z_1 - h_1) \cdot \left(1 - \frac{T_{ext}}{T_{int1}}\right) + (h_2 - z_1) \cdot \left(1 - \frac{T_{ext}}{T_{int2}}\right) \quad (2.10)$$

sendo,  $z_1$  = cota do pavimento da zona 1 (m);  $h_1$  e  $h_2$  = altura das aberturas (m);  $T_{int1}$ ,  $T_{int2}$  = temperatura interior da zona 1 e 2 (K).

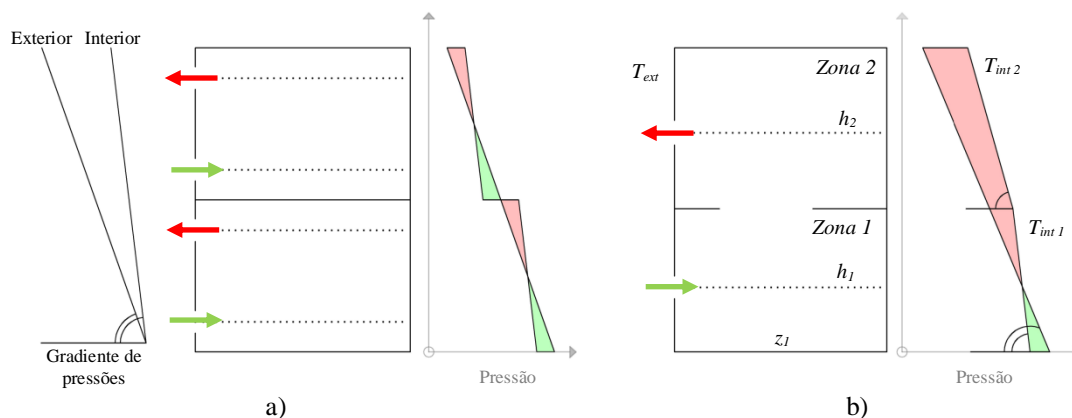


Figura 2.14 - Gradiente de pressão devido ao efeito de chaminé para  $T_{ext} > T_{int}$ . a) Efeito de chaminé em edifícios sem ligação entre zonas. b) Efeito de chaminé em edifícios com ligação entre zonas. Adaptado de [15].

### c) Efeitos combinados

O efeito combinado do vento e do gradiente térmico determina o comportamento dos caudais de ventilação através das aberturas na envolvente do edifício. Estes efeitos podem ter acção conjunta, aumentando o caudal de ventilação, ou acção oposta, reduzindo o caudal de ventilação e, eventualmente anular a ventilação através das aberturas.

O caudal de ventilação gerado pela combinação destes efeitos pode ser determinado segundo vários métodos: lineares, quadráticos, com adição simples das pressões geradas ou interação entre os efeitos. A pressão interior resulta da soma individual das pressões geradas pelo efeito de gradiente térmico e do vento, que, sendo uma combinação de acções não lineares, apenas é correctamente determinada através de processos iterativos. Neste sentido, de entre os métodos referidos, a combinação quadrática dos efeitos, indicada pela expressão (2.11), permite estimar de uma forma simplificada e precisa o caudal de ventilação gerado pelo efeito combinado do vento e gradiente térmico.

$$Q_t = \sqrt{Q_w^2 + Q_s^2} \tag{2.11}$$

sendo,  $Q_t$  = caudal de ventilação através da abertura, gerado pelo efeito combinado ( $m^3 \cdot h^{-1}$ );  $Q_w$  e  $Q_s$  = caudais gerados pelo vento e gradiente térmico ( $m^3 \cdot h^{-1}$ ) calculado, individualmente, de acordo com a expressão (2.1).

Na generalidade das condições atmosféricas (temperatura e vento) a componente do vento tem maior influência no efeito combinado, tal como evidenciado na Figura 2.15.

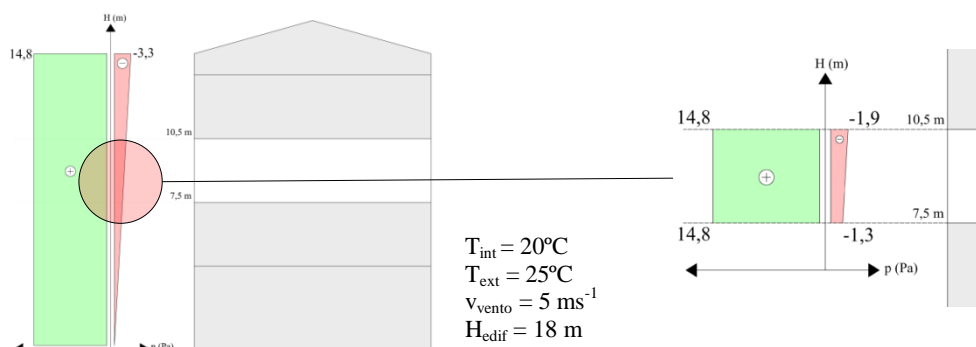


Figura 2.15 – Exemplo das pressões resultantes da acção do vento sobre uma superfície (fachada) e do efeito gradiente térmico.

### 2.3.4. SISTEMAS DE VENTILAÇÃO

Existem quatro tipos de sistemas de ventilação para a renovação do ar interior, a referir, a ventilação natural, a ventilação mecânica, a ventilação mista e a ventilação híbrida, estes dois últimos consistem na associação equilibrada dos sistemas de ventilação natural e mecânica, Figura 2.16.

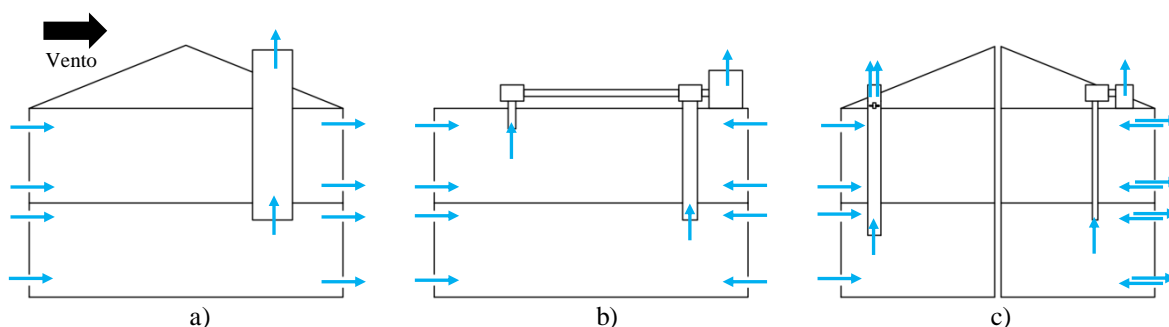


Figura 2.16 - Sistemas de ventilação. a) Ventilação natural (cruzada). b) Ventilação mecânica (extracção). c) Ventilação híbrida e modo misto.

A melhoria de alguns factores tais como, a arquitectura, a geometria, os pormenores construtivos e os materiais empregues nos edifícios, permitem alcançar um elevado nível de estanqueidade ao ar. A elevada estanqueidade da envolvente possibilita a redução, quase total, da infiltração de ar proporcionando um correcto desempenho energético dos edifícios, que no entanto poderá também resultar em efeitos negativos na qualidade do ar interior (QAI). Espaços com níveis de ventilação abaixo do recomendável apresentam, por exemplo, pela incapacidade de extracção de contaminantes e humidade deficiências nas condições de conforto dos ocupantes. Assim, para o equilíbrio eficiente entre os diversos caudais de ventilação natural, variação das condições climáticas e requisitos de conforto, são necessários sistemas de ventilação e de controlo adequados. A contínua inovação de materiais e técnicas permite o aperfeiçoamento destes sistemas e dispositivos, que em conjunto, possibilitam a definição das melhores soluções construtivas desde da fase de projecto do edifício.

#### **2.3.4.1. SISTEMA DE VENTILAÇÃO NATURAL**

A ventilação natural consiste no fluxo de ar gerado pela diferença de pressão entre interior e exterior de um ou mais compartimentos, através de aberturas na envolvente tais como grelhas, condutas e outros dispositivos de ventilação. A diferença de pressão é gerada pela acção do vento atmosférico e ou gradiente térmico e sem recurso a qualquer dispositivo mecânico.

Existem diversas estratégias de ventilação natural, função das características de arquitectura, de construção, do espaço envolvente e dos mecanismos de ventilação.

##### *a) Ventilação em fachada única*

A ventilação em fachada única permite a admissão e exaustão de ar através das aberturas instaladas numa única fachada, Figura 2.17 a). Esta estratégia pode indicar a independência deste compartimento face aos restantes ou a existência de uma única fachada na fracção autónoma. Com a implementação desta estratégia de ventilação a admissão e exaustão de ar ocorre com dificuldade devido à alteração no trajecto natural das massas de ar e, em algumas situações, devido à admissão e exaustão ocorrer através da mesma abertura. Neste sentido, esta estratégia deve ser implementada em fachadas expostas a ventos dominantes, onde é gerado maior diferencial de pressão entre o exterior e o interior motivando a infiltração e, existindo mais que uma abertura, o afastamento das aberturas possibilita a melhor circulação de ar entre os locais de admissão e exaustão.

##### *b) Ventilação cruzada*

Na ventilação cruzada, as aberturas são normalmente colocadas em fachadas opostas estabelecendo a ventilação do compartimento, ou compartimentos, entre a fachada de admissão e a de exaustão, Figura 2.17 b). O posicionamento distinto e distanciado entre as fachadas permite gerar um diferencial de pressões proporcionando a ventilação natural. Este tipo de ventilação é apenas ga-

rantido nas situações onde o circuito de ar seja contínuo, ou seja, sem obstruções no espaço interior para livre passagem de ar entre as fachadas. Neste sentido os elementos de comunicação entre os diversos compartimentos (por exemplo, portas interiores), devem apresentar permeabilidade ao ar mesmo quando encerrados, através de aberturas como folgas inferiores ou grelhas [20].

Uma variante a esta configuração é a ventilação cruzada assistida por torres de vento, Figura 2.17 c). Consiste na recolha ao nível da cobertura de massas de ar e a sua condução a níveis inferiores através de uma torre, servindo as várias aberturas de admissão para a ventilação dos compartimentos até às aberturas opostas, de exaustão. Os edifícios com esta configuração de ventilação caracterizam-se, por exemplo, pela fachada única sem exposição directa aos ventos predominantes.

Existem, por vezes, compartimentos interiores onde não é possível a comunicação directa com o exterior ou sem exposição a ventos predominantes e, conseqüente, carência na renovação de ar recomenda. Apesar da frequente utilização de mecanismos mecânicos de ventilação para estas situações, é possível implementar um sistema de ventilação natural nestes espaços. Definido como ventilação cruzada através de condutas, esta configuração é semelhante ao de ventilação cruzada assistida por torre de vento, estando o bocal da conduta instalado junto à fachada exposta ao vento predominante, conduzindo, sob o pavimento do espaço intermédio, as massas de ar até ao compartimento a ventilar, Figura 2.17 d). Esta estratégia de ventilação envolve pressões muito reduzidas, apresentando alguns impedimentos na sua implementação, em particular, nos edifícios multifamiliares pela necessidade de condutas de grande secção.

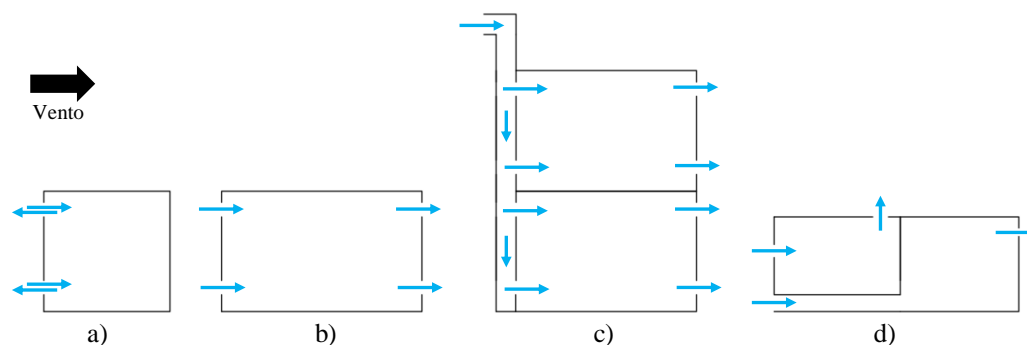


Figura 2.17 - Ventilação em fachada única e configurações da ventilação cruzada. a) Fachada única. b) Cruzada. c) Cruzada assistida por torres de vento. d) Cruzada assistida por condutas. Adaptado de [21].

### c) Ventilação por tiragem térmica

O princípio da tiragem térmica consiste na indução de movimento ao ar e exaustão através da diferença térmica entre exterior e interior de determinado compartimento, originando assim a sua ventilação. Esta configuração do sistema de ventilação natural distingue-se de alguns outros anteriormente descritos, uma vez que a admissão de ar ocorre em reacção à exaustão.

A ventilação por tiragem térmica através de condutas, instaladas verticalmente, permite a condução ascendente e exaustão de ar dos compartimentos até ao exterior, num ponto acima da cobertu-

ra. O contínuo movimento ascendente, ou seja, sem ocorrência de refluxo de ar para o interior dos compartimentos, é determinado pela composição do sistema de ventilação e dos seus elementos. Entre estes elementos destaca-se o isolamento térmico nas condutas, permitindo um maior gradiente térmico entre o interior da conduta e o ambiente exterior. Consoante a disposição dos compartimentos, as aberturas de admissão podem ter ligação directa ao exterior ou indirecta por meio de condutas, definindo assim as variantes deste sistema de ventilação tais como, configuração adjacente, sobreposta e acessória, Figura 2.18.

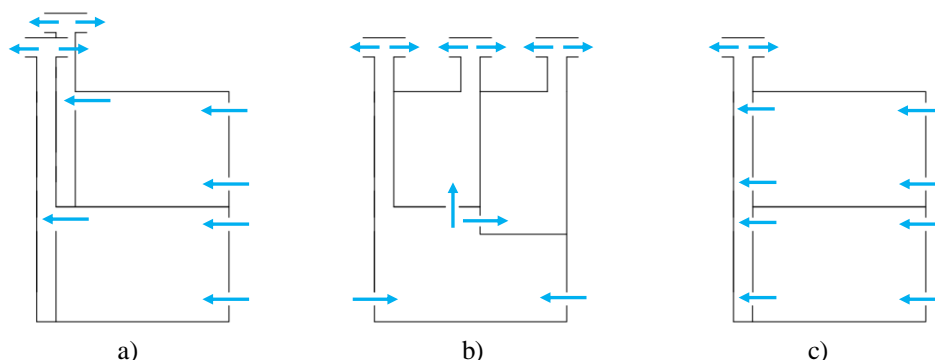


Figura 2.18 – Ventilação por tiragem térmica através de condutas verticais. a) Configuração adjacente. b) Configuração sobreposta. c) Configuração acessória. Adaptado de [21].

A ventilação por tiragem térmica assistida por chaminé solar assenta no aquecimento da massa de ar no interior da chaminé através da radiação solar e, conseqüente, ascensão do ar a níveis superiores provocando o efeito de admissão de “ar novo”, Figura 2.19 a). Os materiais empregues, usualmente materiais metálicos ou outros de grande condutibilidade, e a orientação da chaminé perspectivam a maximização da radiação solar e de ganho térmico.

As zonas de transição, na ventilação por tiragem térmica assistida por zonas de transição, são constituídas por compartimentos ou espaços interiores com menor exigência de ventilação, tanto pela natureza do seu uso como pelo próprio uso, sejam por exemplo caixas de escadas, arrecadações e jardins interiores, Figura 2.19 b). Pela diferença entre estes e os espaços com exigências de ventilação permite gerar um gradiente térmico e de pressão necessário no fenómeno de ventilação. Consoante a comunicação entre as zonas de transição são definidas variantes nesta configuração tais como, zonas de transição adjacente, distanciada ou sobrepostas [22].

Por último, a ventilação por tiragem térmica assistida por fachada dupla cuja aplicação é normalmente implementada em edifícios de serviços, Figura 2.19 c). As fachadas duplas são constituídas por duas superfícies envidraçadas cujo afastamento entre as duas superfícies é, usualmente, de 0,60 m, criando uma caixa-de-ar ventilada de grande dimensão propiciando a circulação de ar através do efeito de chaminé. Este efeito é gerado pelo gradiente de temperatura e de pressão resultante da radiação solar incidente sobre a caixa-de-ar (potenciado pela transparência do vidro), estabelecendo assim a base do sistema de ventilação. A superfície exterior é composta, usualmente, por painéis de vidro formando um pano contínuo com aberturas de admissão e exaustão situa-

das, respectivamente, junto ao solo e no topo do edifício. Dependente das características e requisitos do edifício, as aberturas podem ainda situar-se entre os diversos pisos e com regulação dos caudais de ventilação de admissão e exaustão através de grelhas auto-reguláveis.

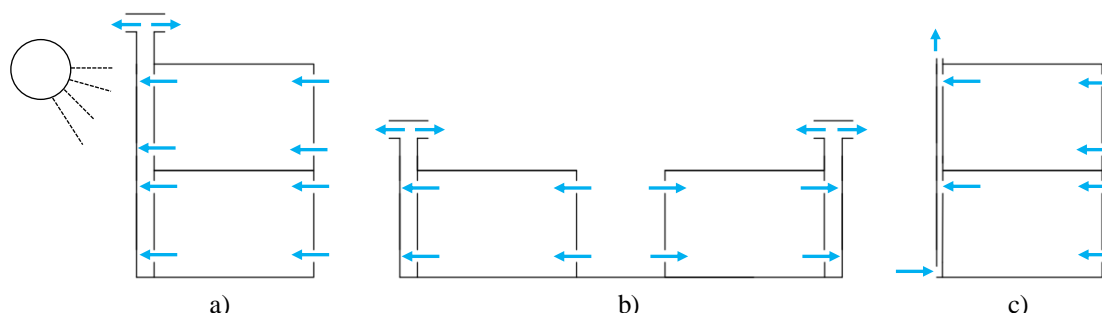


Figura 2.19 - Ventilação por tiragem térmica assistida por chaminé solar, zonas de transição e fachada dupla. a) Chaminé solar. b) Zonas de transição. c) Fachada dupla. Adaptado de [21].

Os sistemas de ventilação natural, conforme já referido, dependem de inúmeros factores, alguns dos quais de elevada aleatoriedade e de difícil controlo, de mencionar a título de exemplo a velocidade, intensidade e direcção do vento. Neste sentido, em algumas situações e, face a factores incompatíveis e de risco como a arquitectura e QAI, é necessário a combinação do sistema de ventilação natural, ou mesmo a sua substituição, por outros tipos de sistemas de ventilação.

#### d) Infiltração através de frinchas na envolvente

A infiltração de ar consiste na admissão de ar através de frinchas, juntas móveis das componentes presentes na envolvente, como janelas, portas e outros locais desconhecidos, e contribui na renovação do ar interior. Este fenómeno, que ocorre em todos os edifícios, é dificilmente controlável pelo sistema de ventilação natural devido aos fenómenos e variáveis que envolve. O grau de influência ou preponderância das infiltrações na renovação do ar depende da permeabilidade global da envolvente, intensidade dos mecanismos de ventilação (vento e temperatura), da arquitectura, da geometria, dos pormenores construtivos e materiais [15].

A permeabilidade ao ar da envolvente afecta o caudal de infiltrações de ar que ocorre nos edifícios e, conseqüentemente, as perdas/ganhos energéticos, o equilíbrio dos sistemas de ventilação e, em alguns casos, as condições de conforto dos ocupantes devido a correntes de ar frio [23].

#### 2.3.4.2. SISTEMA DE VENTILAÇÃO MECÂNICA

A ventilação mecânica consiste na imposição de um gradiente de pressão sobre um ou mais compartimentos através de aparelhos mecânicos, designados por ventiladores. Os sistemas de ventilação mecânica permitem contornar a variabilidade de acção dos mecanismos de ventilação (temperatura e vento) sobre a ventilação de edifícios, através do controlo efectivo do caudal de admissão e ou de extracção. O funcionamento mecânico do sistema apresenta alguns inconvenientes, salien-

tando-se a emissão de ruído, o consumo energético associado ao funcionamento dos ventiladores e os encargos com a manutenção dos equipamentos.

Os sistemas de ventilação mecânica são amplamente utilizados nos países do Norte da Europa, principalmente com recuperação de calor. Em Portugal os sistemas de extracção têm alguma expressão em edifícios multifamiliares recentes.

De seguida, são descritos os sistemas de ventilação mecânica correntemente usados em edifícios de habitação.

### a) *Extracção mecânica*

A ventilação recorrendo à extracção mecânica consiste na exaustão de ar a partir dos compartimentos de serviço (cozinhas e instalações sanitárias) por meio de ventiladores, permitindo, através das pressões negativas criadas no espaço interior, a admissão de “ar novo” pelas aberturas instaladas na envolvente dos compartimentos principais (salas e quartos). As aberturas são em geral formalizadas através de grelhas ou condutas. Usualmente em edifícios multifamiliares, esta estratégia de ventilação apresenta um funcionamento variável, ou seja, o caudal de extracção de ar nos diversos compartimentos de serviço é função dos períodos de maior ocupação, normalmente definido por comando horário e em simultâneo para todo o edifício.

A ventilação mecânica centralizada (VMC) de fluxo simples, uma configuração da ventilação mecânica, é caracterizada pela admissão de ar sem apoio mecânico, ou seja, através de aberturas, frinchas ou dispositivos de ventilação instalados na envolvente e extracção por meio de ventiladores, Figura 2.20 a). A utilização de condutas de pequena secção neste tipo de sistemas possibilita uma larga diversidade e flexibilidade de configurações, facilitando a sua adaptação a diversas situações de arquitectura e construção.

Baseado na configuração anterior, a ventilação mecânica centralizada de duplo fluxo, consiste no balanceamento não equilibrado entre o caudal insuflado e caudal extraído, Figura 2.20 b). Usualmente é insuflado um caudal ligeiramente inferior ao exaurido permitindo um estado de despressurização no espaço interior, imperceptível aos ocupantes, que reduz a possibilidade da condensação do ar húmido insuflado sobre as superfícies interiores.

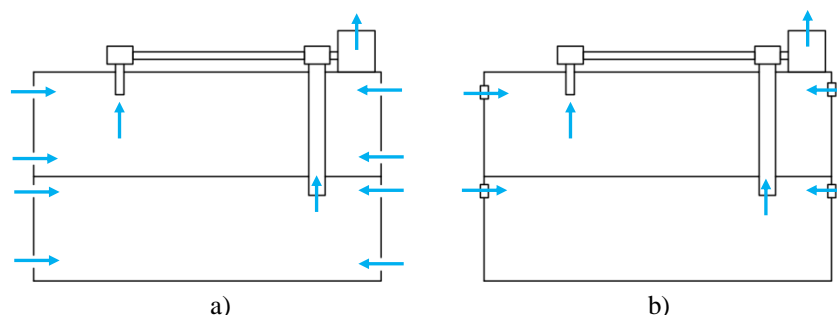


Figura 2.20 - Sistema de ventilação mecânico centralizado. a) Admissão de ar através de aberturas e exaustão mecânica (fluxo simples). b) Admissão e exaustão mecânica (fluxo duplo).

Nas situações onde um sistema de VMC de fluxo simples ou duplo é instalado individualmente em cada fracção autónoma, as aberturas de exaustão do ar ventilado são independentes situando-se nas fachadas ou, se possível, na cobertura. No caso de sistemas colectivos de VMC de fluxo simples ou duplo, os aparelhos encontram-se usualmente na cobertura, extraindo o ar ventilado de múltiplas fracções autónomas, Figura 2.20 b).

#### *b) Insuflação mecânica*

A ventilação por meio de insuflação mecânica apresenta um funcionamento oposto ao sistema de ventilação de extracção, consistindo na admissão de ar nos compartimentos principais (sala e quartos) através de ventiladores. A exaustão do ar ocorre pelas aberturas na envolvente ou condutas, em reacção às pressões positivas geradas no interior da habitação pelos ventiladores. Esta estratégia de ventilação possibilita a insuflação de ar com determinadas propriedades (temperatura, humidade relativa, concentração de poluentes, etc.) através de tratamento prévio do ar por uma unidade de tratamento de “ar novo” (UTAN), com funcionalidades que podem ir da filtragem ao pré-aquecimento ou arrefecimento do ar.

#### **2.3.4.3. SISTEMA DE VENTILAÇÃO MISTO E HÍBRIDO**

Os sistemas de ventilação mistos e mais recentemente os sistemas de ventilação híbridos, consistem na combinação das propriedades dos sistemas de ventilação natural e mecânica, superando os problemas a eles associados com fim a uma melhor performance [15], ou seja, tem por objectivo minimizar o consumo energético assegurando a qualidade do ar interior e o conforto dos ocupantes. Nestes sistemas deve sobressair a utilização integral das condições naturais de ventilação, sendo complementada com a acção dos mecanismos mecânicos apenas em situações não solucionadas pela ventilação natural.

Nos sistemas de ventilação mistos, a renovação do ar geral e permanente é assegurada pela ventilação cruzada, sendo os poluentes gerados nos compartimentos de serviço (cozinha e instalação sanitária) removidos pelo accionamento de ventiladores individuais de extracção de ar, vulgo, exaustores e ventax. Desta forma é possível a exaustão do ar interior para o exterior, assim como a extracção quase instantânea dos poluentes gerados nos compartimentos de serviço, minimizando problemas de QAI ou a ocorrência de condensações. Neste caso, as condutas de evacuação de ar nas cozinhas e instalações sanitárias são dimensionadas para a extracção mecânica de ar, tendo dimensões típicas na ordem de  $\phi 100$  mm. O accionamento dos ventiladores é pontual, através de interruptores, e controlado pelos ocupantes traduzindo-se num consumo de energia relativamente reduzido. Nos restantes períodos (de não funcionamento dos ventiladores), de uma forma geral os ventiladores obstruem a conduta de evacuação de ar (que normalmente têm dimensões inferiores às da ventilação natural) contribuindo de forma reduzida para a ventilação natural da habitação. Apesar das limitações deste sistema, é utilizado maioritariamente em habitações.

A ventilação híbrida, constitui um sistema relativamente recente e no qual é accionado automaticamente um ventilador mecânico de baixa pressão e baixa potência, sempre que as acções naturais sejam insuficientes para assegurar os caudais de ar pretendidos. Nestes sistemas, o edifício é dotado de aspectos construtivos aplicáveis aos edifícios com ventilação natural, sendo, neste caso, o ventilador estático substituído por um ventilador mecânico helicoidal, Figura 2.21 d). A configuração do ventilador e a sua secção livre permite, quando parado, efectuar a extracção natural do ar interior. Existem ainda sistemas híbridos inovadores que possibilitam melhores e diferentes estratégias de controlo sobre funcionamento do sistema em função, por exemplo, da produção de vapor de água, concentração de CO<sub>2</sub> ou movimento dos ocupantes.

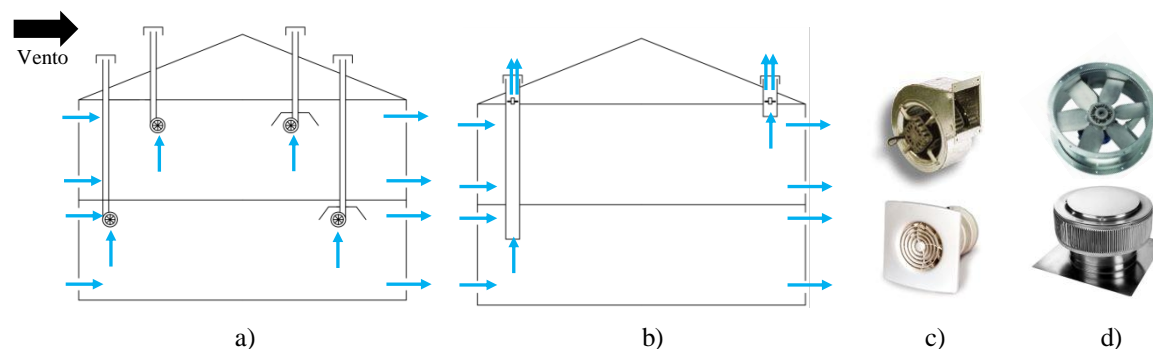


Figura 2.21 – Sistemas de ventilação misto e híbrido. a) Sistema misto. b) Sistema híbrido. c) Exemplo de ventiladores centrífugos utilizados na ventilação modo misto. d) Exemplo de ventiladores helicoidais utilizados na ventilação híbrida.

### 2.3.5. ABERTURAS DE VENTILAÇÃO NA ENVOLVENTE

A estratégia de ventilação através de aberturas na fachada tem por princípio a distribuição de grelhas na envolvente. Figura 2.22. As grelhas são dispositivos que permitem o “controlo” das trocas de ar entre o ambiente exterior e o espaço interior e apresentam um funcionamento regulado, auto-regulado ou higro-regulado. Estas grelhas podem ser ainda servidas por condutas, promovendo o escoamento e distribuição de ar a zonas ou compartimentos afastados do local de admissão [20].

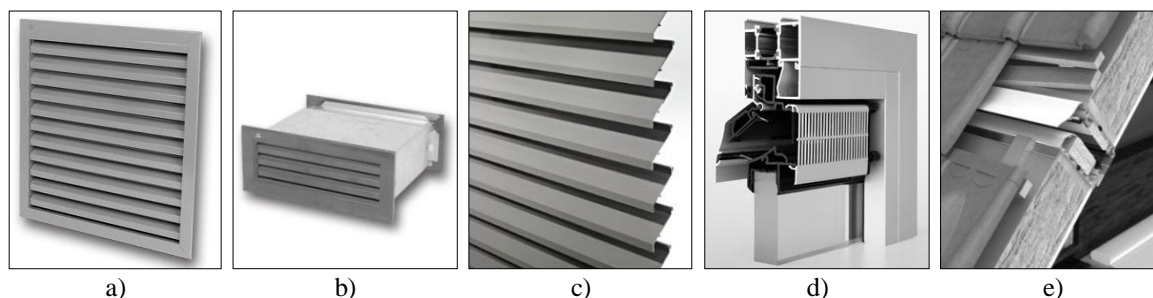


Figura 2.22 – Dispositivos de ventilação. a) Grelha superficial. b) Grelha de encastramento na parede. c) Grelha mural de lâminas. d) Grelha regulável instalada entre envidraçado e caixilharia. e) Grelha regulável instalada na cobertura. [24].

Na reabilitação de edifícios, as soluções de melhoria da permeabilidade ao ar recorre usualmente a grelhas instaladas nos vãos envidraçados, sendo estes os dispositivos de ventilação abordados no presente estudo. Estas grelhas são normalmente instaladas na zona superior das janelas e portas

dos compartimentos principais (quartos e sala), Figura 2.23. As grelhas são caracterizadas de acordo com as respectivas especificações técnicas como área útil da abertura, caudal nominal a diferentes pressões, permeabilidade ao ar e água, comportamento térmico e acústico, etc. O dimensionamento destes dispositivos deve ter em consideração a correcta integração com a restante envolvente, nível de exposição ao vento e o caudal de ar necessário a satisfazer a QAI.

De acordo com algumas bibliografias e textos dedicados a esta temática, é recomendada a utilização de aberturas providas de dispositivos anti-retorno, não permitindo que, por acção do vento, o sentido do fluxo de ar seja invertido (possibilitando a exaustão do ar interior através das grelhas de admissão) [20]. No entanto em espaços residenciais, onde a concentração de poluentes é relativamente reduzida e com recurso à ventilação cruzada, é preferível a instalação de grelhas bidireccionais permitindo a livre admissão e exaustão de ar através destas.

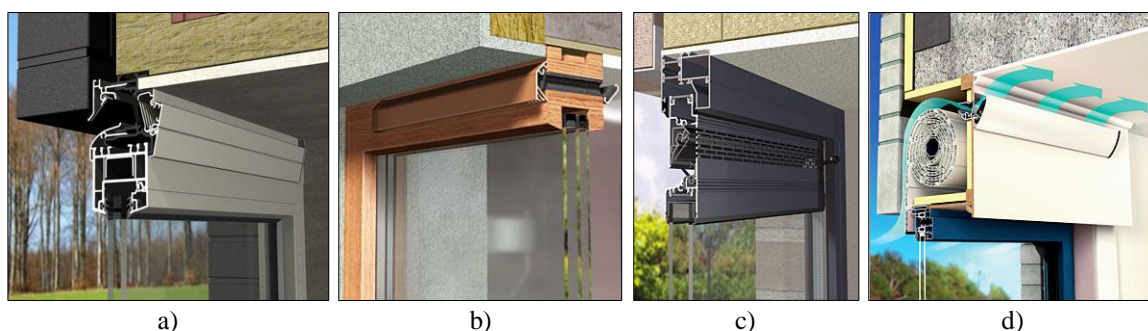


Figura 2.23 – Diferentes modos de instalação de grelhas de ventilação nos vãos envidraçados. a) Acima da caixilharia. b) Na caixilharia. c) Entre a caixilharia e envidraçado. d) Na caixa de estore. [24].

Nas grelhas reguláveis (Figura 2.24), a alteração da área útil de passagem do ar é manual e estática, no entanto, não existe verdadeiramente um controlo total sobre o caudal de ventilação uma vez que é inexequível o ajuste manual da área útil em simultâneo com as oscilações dos mecanismos de ventilação (temperatura e vento). Neste sentido, a periodicidade de regulação das grelhas reguláveis pode ocorrer na transição das principais estações do ano, entre Inverno e Verão, e eventualmente, face à alteração significativa do número de ocupantes ou outras necessidades.

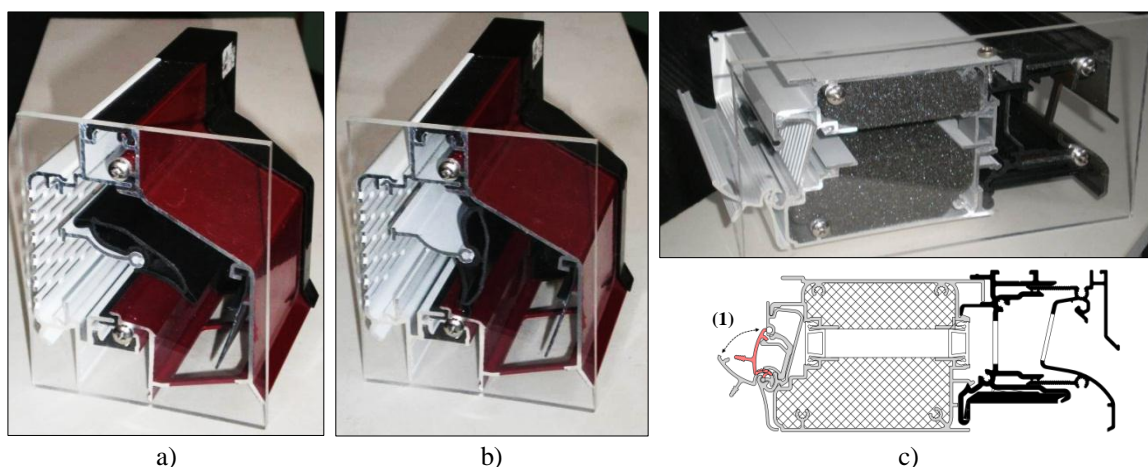


Figura 2.24 - Grelhas de ventilação reguláveis. a) Grelha com a abertura desobstruída. b) Grelha com a abertura obstruída. c) Grelha regulável com redutor acústico: (1) Aba regulável. [24].

As grelhas auto-reguláveis e higr-reguláveis têm um ajuste automático da área útil da abertura em função do diferencial de pressão ou humidade relativa entre o ambiente exterior e o espaço interior. O ajuste da área é definida pela oscilação de uma aba móvel no interior da grelha que permite estabelecer um caudal de ventilação praticamente constante a partir de determinados valores (pressão ou humidade), Figura 2.25 c). A aba móvel diminui a secção da área útil com o aumento do valor dos parâmetros de regulação (diferencial de pressão ou humidade relativa do espaço interior). Comercialmente existem grelhas auto-reguláveis que permitem assegurar um caudal de ventilação praticamente constante a partir de pressões de 2, 10 e 20 Pa.

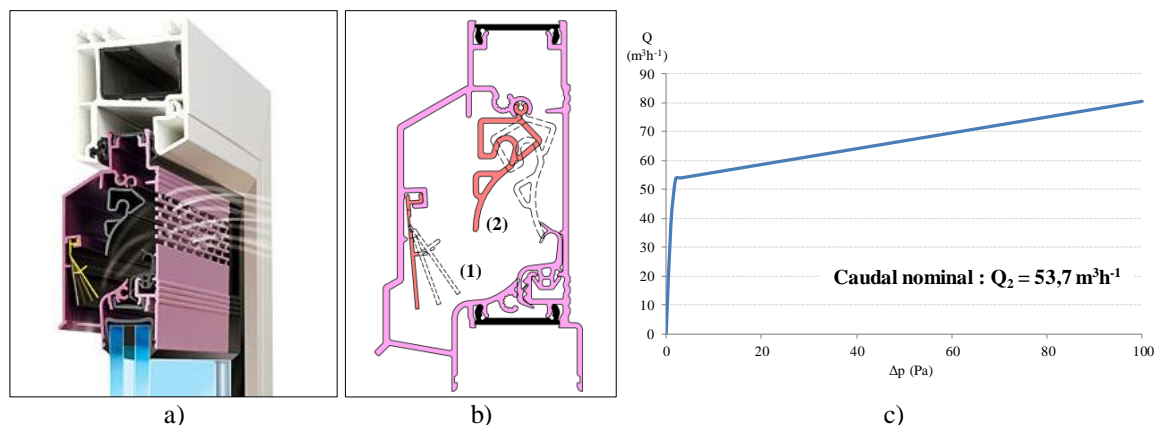


Figura 2.25 - Grelha de ventilação auto-regulável a 2 Pa. a) Grelha instalada entre a caixilharia e envidraçado. b) Mecanismo de funcionamento da grelha, com a abertura desobstruída: (1) Aba auto-regulável; (2) Aba regulável. c) Caudal de ar debitado pela grelha auto-regulável a 2 Pa. [24].

## 2.4. MÉTODOS DE ENSAIO

### 2.4.1. ASPECTOS GERAIS

O cálculo dos caudais de ar em edifícios, através de métodos analíticos é, em muitos casos, uma metodologia pouco expedita e de elevado grau de falibilidade, devido à dificuldade e, até mesmo, ao desconhecimento na quantificação de alguns factores envolvidos.

Ao contrário dos métodos analíticos, os métodos experimentais permitem ultrapassar, em parte, a complexidade de fenómenos e factores que envolve a caracterização da permeabilidade e na determinação dos caudais de ar em edifícios através da avaliação quantitativa das características de fluxo de ar nestes edifícios [15]. Assim, os métodos experimentais permitem a caracterização de determinado edifício ou compartimento, englobando todos os factores e interacções intervenientes resultantes, por exemplo, da geometria do edifício, intensidade e direcção do vento, gradiente de temperatura no espaço interior, diferença de temperatura entre espaço interior e ambiente exterior e espaço envolvente ao edifício.

Em muitos países a avaliação da permeabilidade ao ar da envolvente através de ensaios de pressurização constitui uma prática frequente, sendo mesmo obrigatória em alguns países [25]. A flexibilidade dos métodos de ensaio, descritos em seguida, permite de forma expedita a quantificação

de diversos parâmetros caracterizadores do sistema de ventilação implementado no edifício, e assim assegurar o cumprimento dos regulamentos aplicáveis, nomeadamente os de QAI.

Actualmente os métodos de ensaio utilizados na caracterização da permeabilidade e do sistema de ventilação incluem o ensaio de pressurização e o ensaio do gás traçador, permitindo, respectivamente, a medição da permeabilidade ao ar da envolvente e a medição da taxa de renovação de ar.

#### 2.4.2. ENSAIO DE PRESSURIZAÇÃO

Este ensaio consiste na pressurização e ou despressurização do espaço interior de uma habitação ou compartimento, com recurso a uma “porta ventiladora”, e o registo do caudal de ar necessário movimentar para gerar um determinado diferencial de pressão ( $\Delta p$ ) entre o espaço interior e o ambiente exterior. Este ensaio tem como propósito a caracterização da permeabilidade ao ar da envolvente de um edifício ou parte deste, permitindo obter diversas análises e diagnósticos relativos às infiltrações de ar, destacando-se:

- medição da permeabilidade ao ar e a verificação da sua conformidade com a regulamentação aplicável;
- comparação da permeabilidade ao ar relativa entre diversos edifícios ou partes destes, e;
- identificação dos locais de infiltração de ar.

De salientar que, através deste ensaio, a taxa de renovação de ar não é uma medição directa, podendo ser estimada analiticamente. Outros métodos, tais como o de gás traçador, possibilitam a determinação directa da taxa de renovação de ar.

O ensaio de pressurização permite, ainda e com maior relevância para este estudo, determinar os coeficientes característicos da permeabilidade ao ar da envolvente resultante de medidas de melhoria implementadas e os coeficientes dos diversos componentes que compõem a envolvente, como pavimento, tecto, janelas, fachada e chaminé, através de múltiplos ensaios em situações distintas. Este é o principal objectivo da utilização deste ensaio no presente trabalho.

Os resultados deste ensaio permitem definir a correlação entre os valores de caudais e os respectivos diferenciais de pressão ( $Q$ ,  $\Delta p$ ). A correlação de todos os dados é representada num gráfico bi-logarítmico (Figura 2.26), estabelecendo uma recta de tendência, tipo potencial, que traduz as características de permeabilidade ao ar da envolvente através do coeficiente  $C$  e expoente  $n$ , expressão (2.12):

$$Q = C \cdot (\Delta p)^n \quad (2.12)$$

sendo,  $Q$  = caudal de ar escoado através da abertura ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $C$  = coeficiente de escoamento do ar (-);  $\Delta p$  = diferença de pressão entre o espaço interior e exterior dividido pela abertura (Pa);  $n$  = expoente do escoamento (-). Tipicamente, o expoente  $n$  toma valores compreendidos entre 0,5 e 1,0. No primeiro caso, corresponde a escoamentos turbulentos (frinchas de pequena dimensão) enquanto no segundo caso ( $n = 1,0$ ) corresponde a escoamentos laminares (aberturas de grande

dimensão). Pode no entanto, apresentar valores fora deste intervalo quando existe também variação de dimensão das frinchas [25].

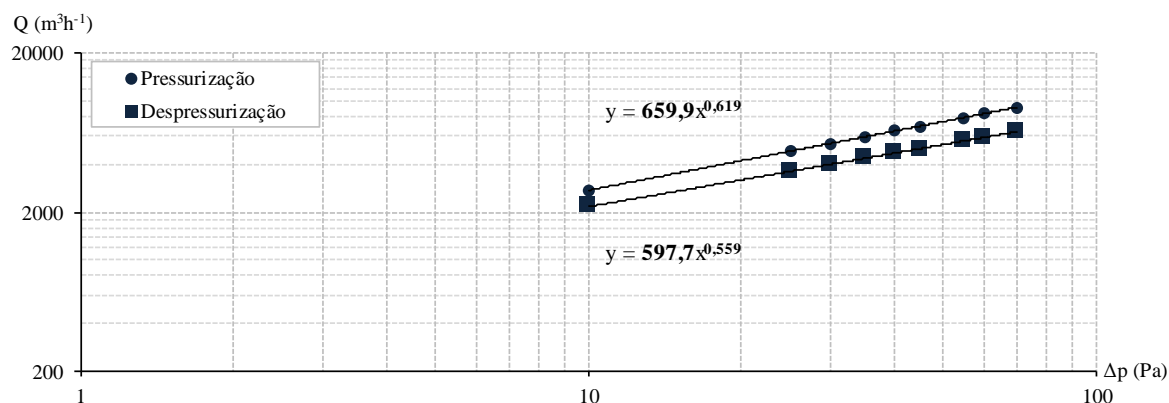


Figura 2.26 – Exemplo do resultado obtido em ensaios de pressurização e despressurização, e respectivas equações de permeabilidade.

Este ensaio é frequentemente utilizado na comparação de entre edifícios, usualmente segundo o tipo e idade da construção, através de um indicador  $n_{50}$  ( $\text{h}^{-1}$ ), que expressa a permeabilidade da habitação a 50 Pa. Este indicador corresponde à razão entre o caudal de ar escoado através da envolvente ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) com  $\Delta p = 50$  Pa e o volume interior do espaço ensaiado ( $\text{m}^3$ ), que pode ser obtido através da expressão (2.13), sendo estimado através múltiplos pontos de leitura ou através de um único ponto que corresponde ao diferencial de pressão de 50 Pa.

$$n_{50} = \frac{Q_{50}}{V} \quad (2.13)$$

A comparação entre edifícios pode ainda ser feita com base em indicadores análogos ao anterior, a mencionar  $q_{50}$  que se refere ao quociente entre a permeabilidade ao ar da envolvente com  $\Delta p = 50$  Pa, por unidade de área da envolvente, expressão (2.14), ou por unidade de área de pavimento,  $w_{50}$ , obtido pela expressão (2.15):

$$q_{50} = \frac{Q_{50}}{A_E} \quad (2.14)$$

$$w_{50} = \frac{Q_{50}}{A_F} \quad (2.15)$$

A seguinte descrição do método de ensaio tem por base a norma EN 13829:2000 [26], na qual são descritas as metodologias a utilizar na medição *in situ* da permeabilidade ao ar de edifícios. De acordo com a norma de ensaio, foi também elaborado um procedimento e relatório de ensaio como ferramenta auxiliar para os trabalhos experimentais, respectivamente ANEXO A.2 e ANEXO A.4.

### *a) Preparação do espaço de ensaio*

Dependendo do objectivo, são especificados dois métodos para os ensaios de pressurização, método A e método B. O método A permite determinar a permeabilidade ao ar de um edifício ou compartimento em plena utilização, estando as aberturas e sistemas de aquecimento ou arrefecimento na condição normal de utilização. O método B, com aplicação no presente trabalho, permite a avaliação efectiva da permeabilidade ao ar da envolvente encerrando todas as aberturas exteriores intencionais.

Neste sentido, segundo o método B, todos os elementos do edifício com comunicação directa para o exterior (janelas, portas, etc.) devem estar fechados. Os elementos interiores, à excepção de armários, vestuários, e outros do género, devem estar abertos permitindo uma pressão uniforme em todas as áreas em ensaio. Em edifícios servidos por sistemas de aquecimento, ventilação mecânica ou ar-condicionado, estes equipamentos devem estar desligados. Nos edifícios parcialmente degradados e em situações onde, em condições normais de ocupação não se prevejam aberturas, devem ser seladas todas as aberturas que permitam a comunicação directa entre o espaço interior e o ambiente exterior. São exemplos, a ausência de sifonagem em aparelhos sanitários, juntas pronunciadas em elementos da caixilharia exterior e componentes danificados (vidros partidos, etc.).

### *b) Condições de ensaio*

A precisão dos dados experimentais registados neste ensaio depende da calibração dos equipamentos envolvidos, segundo as especificações do fabricante, e das condições ambientais presentes a quando da realização do ensaio. Nesta última situação, caso a diferença de temperatura entre exterior e interior ( $K$ ) multiplicada pela altura da envolvente do edifício ( $m$ ) resulte num valor superior a  $500 \cdot m \cdot K$ , é provável que a diferença de pressão entre o espaço interior e o ambiente exterior não seja satisfatória, ou seja, as condições impostas pelo ensaio não se sobrepõem às ambientais. Identicamente para ventos superiores a  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . A velocidade e direcção do vento, podem ser determinados através dos valores registados em estações meteorológicas próximas do local de ensaio e, eventualmente, corrigidos devido à diferença de rugosidade entre estes locais, como se descreve na Secção 2.3.3.

### *c) Montagem do equipamento*

O equipamento de ensaio consiste numa porta ventiladora, que é composta por um ventilador, por um controlador automatizado de pressão e de caudal de ar, por um controlador de velocidade do ventilador e por uma moldura de porta ajustável. A moldura deve ser instalada numa porta do edifício com ligação para o exterior, normalmente a porta principal, e orientada para um espaço interior aberto e amplo. Usualmente, os restantes equipamentos de ensaio são instalados no inte-

rior da habitação e controlados, pelo operador, também no interior do espaço de ensaio. A descrição pormenorizada da instalação e configuração dos equipamentos é definida no documento de procedimento apresentado no ANEXO A.2.

#### *d) Procedimento de ensaio*

O espaço de ensaio é pressurizado e ou despressurizado com um caudal de ar variável permitindo, deste modo, alcançar uma determinada gama de valores de diferencial pressão ( $\Delta p$ ) entre 10 e 60 Pa (ou outra gama equivalente), definindo assim vários pontos de correlação. Esta gama de pressões diferenciais é significativamente superior às pressões geradas naturalmente (entre 0 e 5 Pa), e tem por objectivo minimizar a influência dos mecanismos de ventilação (vento e temperatura) sobre os resultados de ensaios. Em habitações com elevada permeabilidade ao ar ou de elevado volume ( $> 4000 \text{ m}^3$ ) não é possível atingir os diferenciais de pressão máximos de ensaio ( $\approx 60 \text{ Pa}$ ), pelo que a gama de pressões deve ser alterada, se possível, com incrementos mínimos de 10 Pa e cinco pontos de leitura.

Em geral, as frinchas conferem um comportamento variável consoante o sentido do fluxo de ar infiltrado, esta situação é observável pela não sobreposição das curvas de pressurização e de despressurização. Este fenómeno é exposto pelo comportamento diferenciado, por exemplo, das janelas de batente, nas quais a junta móvel é fechada no ensaio de pressurização e aberta no ensaio de despressurização aumentando a permeabilidade ao ar do elemento. Deste modo, é recomendado realizar dois conjuntos de ensaios, um de pressurização e um outro de despressurização.

A porta ventiladora permite ainda auxiliar na identificação das principais frinchas que contribuem na troca de ar entre o espaço interior e o ambiente exterior, utilizando o gerador de fumos durante a pressurização do espaço. Esta identificação permitirá, eventualmente, reunir informações importantes na elaboração de soluções de melhoria da permeabilidade.

#### *e) Relatório de ensaio*

Durante a execução dos ensaios deve ser preenchido o relatório de ensaio, permitindo registar todas as informações importantes e necessárias a futuras observações e interpretações dos dados de ensaio. O relatório de ensaio é composto pelo formulário preenchido, gráficos de pressurização e ou despressurização do espaço ensaiado e qualquer outro elemento relevante ao ensaio.

### **2.4.3. ENSAIO DE GÁS TRAÇADOR**

Este ensaio consiste na injeção e monitorização da concentração de um gás ao longo do tempo de ensaio, permitindo a medição directa da taxa de renovação horária de ar em determinado compartimento ou habitação. A selecção do tipo de gás traçador deve ter em consideração a sua natureza, nomeadamente a não toxicidade, estabilidade química, não absorvível por materiais ou compo-

mentos do edifício, densidade próxima ao do ar interior e, por fim, a presença na atmosfera em baixa concentração permitindo a fácil detecção e monitorização. Os gases mais comuns nestes ensaios são o óxido nitroso ( $N_2O$ ), hexafluoreto de enxofre ( $SF_6$ ), hélio (He) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ), tendo sido este último o utilizado nos ensaios que compõem este trabalho. O dióxido de carbono ( $CO_2$ ) apesar de envolver diversos aspectos positivos, comparativamente aos restantes gases, como o custo e facilidade de medição através diversas técnicas, apresenta alguns inconvenientes como a absorção por parte de materiais do edifício e mobiliário conduzindo, eventualmente, a resultados de menor rigor. Outro aspecto importante na utilização do  $CO_2$  nestes ensaios, e com influência sobre os resultados experimentais, é a produção adicional no espaço de ensaio de  $CO_2$  pela ocupação humana, ou de outros seres vivos. Dado que, actualmente, o registo dos dados de ensaio é efectuado com recurso a sistemas autónomos, este último aspecto não é condicionante. Os meios de medição e monitorização da concentração mais utilizados actualmente, são os analisadores de gás, face à capacidade de aquisição automática em intervalos de tempo definidos, precisão e custo.

Existem modos distintos de quantificar as taxas de renovação de ar, dependendo do regime de concentração do gás traçador mantido ao longo do ensaio:

- injeção única no início do ensaio (com aplicação no presente estudo);
- injeção constante ao longo do ensaio, e;
- injeção variável ao longo do ensaio.

A variação na concentração de gás traçador, traduzida pela expressão (2.16) [15], é dada pela quantidade de gás gerado no interior do espaço de ensaio somando e subtraindo, respectivamente, a quantidade de gás que entra através da admissão e a que sai através da exaustão de ar devido à renovação do ar.

$$V \frac{dc}{dt} = G + Q \cdot c_e - Q \cdot c \quad (2.16)$$

sendo,  $V$  = volume interior do espaço ( $m^3$ );  $Q$  = caudal de ar escoado ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  $c_e$  = concentração de gás traçador do exterior (ppm);  $c$  = concentração de gás traçador no interior (ppm) no instante  $t$ ;  $G$  = caudal de gás traçador introduzido no interior do espaço ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ).

Esta expressão permite a determinação das taxas de renovação de ar através dos três diferentes modos ou regimes de concentração, função do tipo de emissão e controlo do gás traçador. A técnica de ensaio descrita e utilizada nos ensaios experimentais presentes neste trabalho é a do decaimento, que consiste na injeção única de gás traçador no interior do espaço de ensaio até determinada concentração. Concluída a injeção são monitorizados e registados os valores de concentração de gás traçador presente no ar interior que são, tendencialmente, decrescentes ao longo do tempo de ensaio (devido à renovação de ar) até à concentração natural do gás no ambiente.

Com base na expressão (2.16), e considerando que após a injeção de gás traçador não existe qualquer fonte de gás com composição química igual ao do gás traçador no interior do espaço de ensaio ( $G = 0$ ), nem a presença relevante desse gás na composição do ar renovado ( $c_e = 0$ ), a formulação que determina a taxa de renovação horária da técnica utilizada tem, a partir da expressão (2.16), o seguinte desenvolvimento:

$$V \cdot \frac{dc}{dt} = -Q \cdot c \Leftrightarrow \frac{dc}{c} = -\frac{Q}{V} \cdot dt$$

Integrando em  $c$ , entre  $t = 0$  e  $t$  obtemos:

$$\int_{c_0}^c \frac{dc}{c} = -\frac{Q}{V} \int_0^t dt \Leftrightarrow \ln c - \ln c_0 = -\frac{Q}{V} \cdot t \Leftrightarrow c = c_0 \cdot e^{-\frac{Q}{V}t} \Leftrightarrow c = c_0 \cdot e^{-n \cdot t} \quad (2.17)$$

Ou seja, a correlação concentrações registadas ( $c$ ) e do tempo ( $t$ ) permite definir uma curva de decaimento da concentração de gás traçador ao longo do ensaio, em que a taxa de renovação horária de ar ( $n$ ), do espaço ensaiado, é definida pelo expoente da expressão dessa curva. Na Figura 2.27 é apresentado o exemplo da determinação da curva de decaimento e respectiva taxa de renovação acordo com a expressão (2.17).

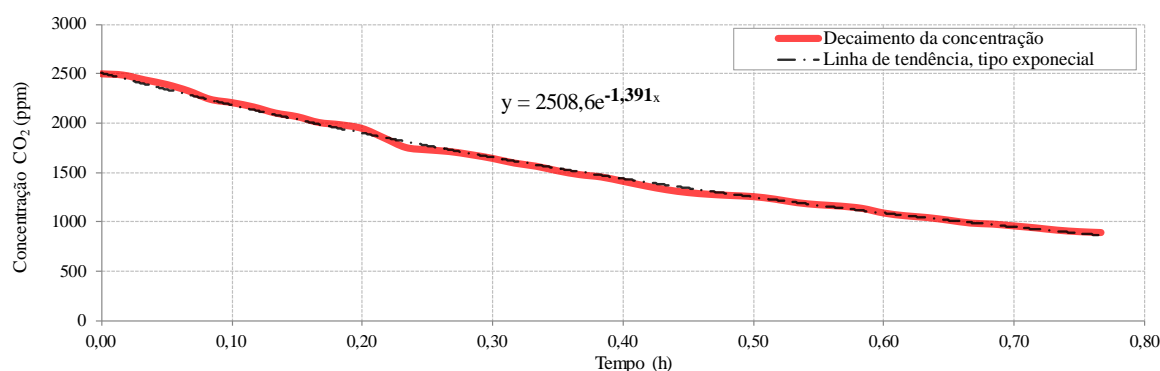


Figura 2.27 – Exemplo da determinação da taxa de renovação de ar horária de uma habitação utilizando a técnica do declive.

A seguinte descrição do método de ensaio tem por base a norma EN 12569:2000 [27], na qual são descritas as metodologias a utilizar na determinação das taxas de renovação de ar em edifícios. De acordo com a norma de ensaio, foi também elaborado um procedimento e relatório de ensaio como ferramenta auxiliar nestes trabalhos experimentais, respectivamente ANEXO A.3 e ANEXO A.5.

#### a) Preparação do espaço de ensaio

Todos os elementos do edifício com aberturas para o exterior (janelas, portas, etc.) devem estar fechados. Os elementos interiores, à excepção de armários, vestuários, e outros do género, devem estar abertos permitindo uma homogeneização do gás em todas as áreas de ensaio. Em edifícios servidos por sistemas de aquecimento, ventilação mecânica ou ar-condicionado, estes devem estar desligados. Nos edifícios parcialmente degradados e em situações onde, em condições normais de

ocupação não se prevejam aberturas, devem ser seladas todas as aberturas que permitam a comunicação directa entre o espaço interior e o ambiente exterior. São exemplos, a ausência de sifonagem em aparelhos sanitários, juntas pronunciadas nos elementos da caixilharia exterior e elementos danificados na envolvente (vidros partidos, etc.).

### b) Condições de ensaio

A precisão dos dados experimentais registados neste ensaio depende da calibração dos equipamentos envolvidos, segundo as especificações do fabricante, e das condições ambientais presentes a quando da realização do ensaio. De salientar que, os valores das taxas de renovação horária do ar, determinados nestes ensaios, reflectem as condições ambientais no qual o ensaio foi realizado, sendo importante o registo da velocidade do vento, bem como das temperaturas exterior e interior durante o ensaio. Dado este facto, não é possível a comparação directa entre os diferentes ensaios caso se registem condições ambientais significativamente diferentes.

### c) Procedimento de ensaio

O ensaio inicia-se com a introdução do gás, neste caso de CO<sub>2</sub>, de modo uniforme por todo o espaço, até à concentração pretendida ou o de limite de detecção do analisador de gás. Para a correcta mistura de gás traçador e ar interior, deve ser utilizado, em simultâneo com a injeção, ventiladores ou outros meios para a correcta homogeneização com o ar interior, garantindo em todas as zonas do espaço de ensaio uma concentração uniforme de gás traçador. O desvio na concentração entre diferentes zonas não deve ser superior a 10% do valor médio (este fenómeno pode ser controlado ou verificado pela colocação de múltiplos analisadores de gás pelo espaço de ensaio, constatando-se ou não concentrações de gás semelhantes entre eles).

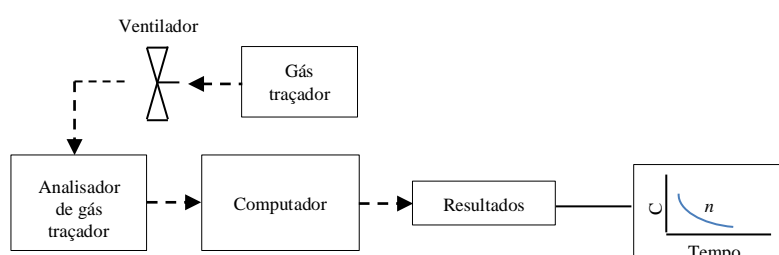


Figura 2.28 - Esquema de ensaio de gás traçador pelo método do decaimento ou declive

### d) Relatório de ensaio

Durante a execução dos ensaios deve ser preenchido o relatório de ensaio, permitindo registar todas as informações importantes e necessárias a futuras observações e interpretações dos dados de ensaio. O relatório de ensaio é composto pelo formulário preenchido, gráficos de decaimento da concentração de gás no espaço ensaiado e qualquer outro elemento relevante ao ensaio.

## 2.5. MODELOS DE ESTIMATIVA DOS CAUDAIS DE VENTILAÇÃO

Estes modelos são procedimentos simplificados baseados em dados empíricos e semi-empíricos resultantes, respectivamente, de ensaios experimentais ou teóricos. Através destes modelos é possível estimar as taxas de infiltração de ar em edifícios de habitação ou outras tipologias de pequena dimensão. Esta restrição está relacionada com a heterogeneidade de alguns parâmetros presentes em edifícios com maior dimensão e não traduzidos através destes modelos.

Apesar de algumas limitações de aplicação, a utilidade dos modelos que se apresentam de seguida, reside, na sua maioria na fácil utilização, permitindo uma estimativa rápida dos caudais de ventilação a partir de poucos parâmetros ou de simples determinação, tais como áreas de aberturas ou diferenças de temperatura.

### a) Modelo ASHRAE

Este modelo combina os caudais de ventilação proporcionados pela combinação dos efeitos de gradiente térmico e a acção do vento, e permite calcular o caudal de infiltração escoado através da envolvente. Um dos parâmetros utilizados nesta formulação é a área permeável efectiva da envolvente, que pode ser determinada experimentalmente pelo método de pressurização, descrito anteriormente (Secção 2.4.2), ou através de valores tabelados [28].

$$Q = A \cdot \sqrt{(a \cdot \Delta T + b \cdot v_r^2)} \quad (2.18)$$

sendo,  $Q$  = caudal de ar escoado através da abertura ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $A$  = área permeável efectiva da envolvente ( $\text{cm}^2$ );  $a$  = coeficiente devido ao efeito chaminé ( $\text{m}^6 \cdot \text{h}^{-2} \cdot \text{cm}^{-4} \cdot \text{K}^{-1}$ );  $b$  = coeficiente devido ao efeito do vento ( $\text{m}^4 \cdot \text{s}^2 \cdot \text{h}^{-2} \cdot \text{cm}^{-4}$ );  $\Delta T$  = diferença entre temperatura exterior e interior (K);  $v_r$  = velocidade média do vento registado numa estação meteorológica próxima ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). O coeficiente  $a$  e  $b$  dependem da altura do edifício ou espaço de ensaio, sendo este último ainda dependente do nível de protecção do edifício ao vento, Quadro 2.5.

Quadro 2.5 – Determinação do coeficiente  $a$  e  $b$  da expressão (2.18). Adaptado de [15].

Coeficiente	Nível de protecção	Altura do edifício (número de pisos)		
		1	2	3
$a$	-	0,00188	0,00376	0,00564
	I	0,00413	0,00544	0,0064
$b$	II	0,00319	0,00421	0,00495
	III	0,00226	0,00299	0,00351
	IV	0,00135	0,00179	0,00209
	V	0,00041	0,00054	0,00063

Legenda:

- $a$  Adimensional, dependente da altura do edifício.
- $b$  Adimensional, dependente da altura do edifício e nível de protecção ao vento.
- I Sem obstruções ou protecções.
- II Protecção ligeira, algumas obstruções.
- III Protecção moderada, edifícios vizinhos com altura semelhante.
- IV Protecção elevada, obstruções com maior altura, zonas suburbanas.
- V Protecção muito elevada, grandes obstruções, zonas urbanas.

### b) Modelo British Standard (BS 5925:1991)

Este modelo empírico permite o cálculo das taxas de infiltração através de aberturas considerando um escoamento bidireccional e não contabilizando a influência das divisões interiores do espaço. O modelo contempla, nas suas formulações, os sistemas de ventilação natural em fachada única (aberturas instaladas numa só fachada) e de ventilação cruzada (de aberturas instaladas em fachadas opostas), em função de parâmetros como acção do vento, efeito chaminé e o efeito combinados destes [15].

Quadro 2.6 - Caudais de ventilação em fachada única. Modelo BS 5925:1991. Adaptado de [15].

Mecanismo de ventilação	Fórmula
Acção do vento com uma abertura	$Q = 0,025 \cdot A \cdot U_{ref}$ $A = \text{área da abertura (m}^2\text{); } U_{ref} = \text{velocidade do vento (m}\cdot\text{s}^{-1}\text{)}$
Gradiente térmico com uma abertura na fachada (janela)	$Q = C_d \cdot \frac{A}{3} \cdot J(\emptyset) \cdot \left( \frac{\Delta T_{int-ext} \cdot g \cdot h}{\bar{T}} \right)^{0,5}$ $J(\emptyset) = \text{função do efeito no caudal do ângulo de abertura da janela; } C_d = \text{coeficiente de descarga (-); } \bar{T} = \text{temperatura média entre exterior e interior (K); } g = \text{aceleração da gravidade (m}^2\text{) e } h = \text{altura da abertura (m).}$
Gradiente térmico com duas aberturas na fachada	$Q = C_d \cdot (A_1 + A_2) \left[ \frac{\varepsilon \cdot (2)^{0,5}}{(1 + \varepsilon) \cdot (1 + \varepsilon^2)^{0,5}} \right] \left( \frac{\Delta T_{int-ext} \cdot g \cdot h}{\bar{T}} \right)^{0,5}$ $A_1 \text{ e } A_2 = \text{áreas das aberturas (m}^2\text{); } \varepsilon = \text{relação entre aberturas (} A_1/A_2\text{);}$

Quadro 2.7 - Caudais gerados em ventilação cruzada. Modelo BS 5925:1991. Adaptado de [15].

Mecanismo de ventilação	Fórmula
Acção do vento com duas aberturas em cada fachada	$Q_w = C_d \cdot A_w \cdot U_{ref} \cdot (\Delta C_p)^{0,5}$ sendo, $\frac{1}{A_w^2} = \frac{1}{(A_1 + A_2)^2} + \frac{1}{(A_3 + A_4)^2}$ $A_1, A_2, A_3, A_4 = \text{áreas das aberturas (m}^2\text{) e } \Delta C_p = \text{diferença entre coeficientes de pressão nas fachadas (-).}$
Gradiente térmico com duas aberturas em cada fachada	$Q_b = C_d \cdot A_b \cdot \left( \frac{2 \cdot \Delta T_{int-ext} \cdot g \cdot h}{\bar{T}} \right)^{0,5}$ sendo, $\frac{1}{A_b^2} = \frac{1}{(A_1 + A_3)^2} + \frac{1}{(A_2 + A_4)^2}$ $A_1, A_2 = \text{áreas das aberturas do nível inferior (m}^2\text{); } A_3, A_4 = \text{áreas das aberturas ao nível mais elevado (m}^2\text{) e } h = \text{altura entre aberturas (m).}$
Efeito combinado com duas aberturas em cada fachada	$Q = Q_b$ se $\frac{U_{ref}}{\sqrt{\Delta T}} < 0,26 \cdot \sqrt{\left(\frac{A_b}{A_w}\right)} \cdot \sqrt{\left(\frac{h}{\Delta C_p}\right)}$ a) $Q = Q_w$ se $\frac{U_{ref}}{\sqrt{\Delta T}} > 0,26 \cdot \sqrt{\left(\frac{A_b}{A_w}\right)} \cdot \sqrt{\left(\frac{h}{\Delta C_p}\right)}$

### c) Modelo de Gidds e Phaff

Diversos textos da bibliografia dedicada a esta temática indicam que em situações onde a direcção do vento é predominantemente paralela à fachada ou de ventilação em fachada única, o efeito

chaminé (ou gradiente térmico) é o principal mecanismo de ventilação. Neste sentido, este modelo permite determinar o caudal de ventilação, nas situações mencionadas, contabilizando a influência das turbulências geradas pelo vento e características construtivas do edifício sobre efeito chaminé [29].

Na ventilação em fachada única, a velocidade efectiva pode ser expressa em função do caudal que é escoado através de metade da janela (metade de admissão, metade de exaustão), expressão (2.19).

$$v_{ef} = \frac{2Q}{A}$$

Assim,

$$Q = \frac{A}{2} \cdot \sqrt{0,001 \cdot U_{met}^2 + 0,0035 \cdot H \cdot \Delta T_{int-ext} + 0,01} \quad (2.19)$$

sendo,  $Q$  = caudal de ar escoado através da abertura ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  $A$  = área da abertura ( $m^2$ );  $U_{met}$  = velocidade do vento registada numa estação meteorológica próxima ( $m \cdot s^{-1}$ );  $H$  = altura da abertura (m);  $\Delta T_{int-ext}$  = diferença de temperatura entre interior e exterior (K).

#### d) Modelo Aynsley

Este modelo permite o cálculo do caudal de ar escoado através de duas aberturas colocadas em fachadas opostas (ventilação cruzada) tendo como principal mecanismo de ventilação a acção do vento. A expressão (2.20) deriva do caudal global gerado pela acção do vento considerando a conservação de massa entre as duas aberturas e utilizando no cálculo os coeficientes de pressão pela acção do vento e de perda de carga [29].

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{C_{p1} + C_{p2}}{\frac{1}{A_1^2 \cdot C_{d1}^2} + \frac{1}{A_2^2 \cdot C_{d2}^2}}} \cdot U_{ref}} \quad (2.20)$$

sendo,  $Q$  = caudal de ar escoado através da abertura ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  $C_{p1}$  e  $C_{p2}$  = coeficientes de pressão em cada fachada (-);  $A_1$  e  $A_2$  = áreas das aberturas ( $m^2$ );  $C_{d1}$  e  $C_{d2}$  = coeficientes de perda de carga referente às configurações das aberturas (-);  $U_{ref}$  = velocidade de referência do vento ( $m \cdot s^{-1}$ ).

#### e) Modelo Princeton “folklore”

Este método é baseado em dados e resultados obtidos experimentalmente de ensaios de pressurização e de gás traçador. A correlação entre os resultados dos indicadores obtidos nos ensaios de pressurização e os valores das taxas de renovação de ar, determinadas pelos ensaios de gás traçador, permite definir a sua relação através de uma constante.

A estimativa da taxa de renovação de ar horária ( $R_{ph}$ ) resulta da “conversão” do valor de  $n_{50}$ , permeabilidade ao ar da envolvente para  $\Delta p = 50$  Pa, através da sua divisão por uma constante, que em geral toma o valor 20, podendo no entanto variar entre 10 e 30 tendo em consideração a di-

mensão do edifício e o nível de protecção ao vento, expressão (2.21). Apesar de estimar valores admissíveis, este modelo ignora diversos factores de grande influência nas taxas de renovação como o efeito chaminé, direcção e intensidade do vento, nível de protecção do edifício ao vento e características das aberturas [16].

$$R_{ph} = \frac{n_{50}}{X} \quad (2.21)$$

$X = 10$ , edifícios de perfil elevado e vento superior a  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;

$X = 30$ , edifícios de perfil baixo e vento inferior a  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;

$X = 20$ , situações intermédias às anteriores.

#### f) Modelo LBL

Este modelo tem por base o mesmo conceito do modelo anterior, modelo *Princeton "folklore"*, a taxa de renovação de ar horária de determinada habitação ou compartimento é estimada a partir do indicador  $n_{50}$  obtido experimentalmente pelos ensaios de pressurização, sendo a conversão ajustada pela introdução alguns parâmetros que reflectem as características relevantes do edifício e do meio envolvente, expressão (2.22).

O factor global de correlação,  $N$ , integra algumas variáveis das quais dependem as infiltrações de ar como os factores relativos ao clima, altura do edifício, nível de protecção ao vento e permeabilidade ao ar da envolvente, expressão (2.23).

$$R_{ph} = \frac{n_{50}}{N} \quad (2.22)$$

Onde  $N$  é definido por,

$$N = C \cdot H \cdot S \cdot L \quad (2.23)$$

sendo,  $N$  = factor global de correlação;  $C$  = factor de correcção relativo à altura;  $S$  = factor de correcção referente ao nível de protecção ao vento do edifício;  $L$  = factor de correcção referente à permeabilidade ao ar da envolvente. Os factores podem ser consultados no Quadro 2.8.

Quadro 2.8 - Determinação dos factores de correcção do modelo LBL.

<i>Factor de correcção</i>	<i>Parâmetros</i>			
H	Número de pisos			
	1	1,5	2	3
	1,0	0,9	0,8	0,7
C	Clima			
	Entre 14 e 26			
S	Nível de protecção			
	Protegido	Normal	Exposto	
	1,2	1,0	0,9	
L	Permeabilidade da envolvente			
	Baixa	Normal	Alta	
	1,4	1,0	0,7	

O factor climático  $C$  é função da temperatura e dos ventos anuais médios, e foi determinado para várias regiões dos Estados Unidos, não expressando correctamente as características climáticas do

território nacional. Neste sentido, foi efectuada uma campanha experimental composta por ensaios de pressurização e de gases traçadores realizados em diversos edifícios unifamiliares, com vista à caracterização das infiltrações médias anuais e determinação do parâmetro  $N$  que seja representativo do edificado e clima de Portugal continental [30]. A expressão (2.25) resulta da regressão linear dos resultados obtidos na campanha experimental e envolve quatro variáveis equiparáveis aos factores descritos no Quadro 2.8. Neste estudo ([30]), o valor de  $N$  depende da qualidade e tipo de construção, velocidade do vento, exposição das aberturas ao vento e, por fim, a diferença de temperatura entre o espaço interior e o ambiente exterior, expressão (2.24). Comparativamente aos factores de correcção do modelo *LBL*, estas variáveis permitem um melhor enquadramento a diversas situações e condições, sendo a subjectividade das variáveis “qualidade e tipo de construção” representada pelo indicador  $n_{50}$ , determinado experimentalmente através do ensaio de pressurização.

$$N = \beta_0 + \beta_1 \cdot n_{50} - \beta_2 \cdot V^2 - \beta_3 \cdot Exp - \beta_4 \cdot \Delta T \quad (2.24)$$

Neste estudo os coeficientes  $\beta_i$ , indicados na expressão (2.24), são determinados com base em resultados obtidos experimentalmente nos ensaios de pressurização e de gases traçadores, permitindo estabelecer a expressão (2.25):

$$N = 21,9 + 0,74 \cdot n_{50} - 0,00556 \cdot v^2 - 0,04 \cdot Exp - 1,8 \cdot \Delta T \quad (2.25)$$

sendo,  $N$  = factor que relaciona o parâmetro  $n_{50}$  com a taxa de renovação de ar (-);  $n_{50}$  = permeabilidade ao ar da envolvente para  $\Delta p = 50$  Pa por unidade de volume ( $\text{h}^{-1}$ );  $v$  = velocidade do vento ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $Exp$  = percentagem de área de aberturas do edifício expostas segundo a direcção predominante do vento, contabilizada em projecção segundo o plano perpendicular a essa direcção (%);  $\Delta T$  = diferença de temperatura entre o espaço interior e ambiente exterior (K).

### g) Modelo *LBL* melhorado

Este método resulta do desenvolvimento e simplificação da análise teórica da ventilação, incorporando os efeitos da permeabilidade e dos mecanismos de ventilação, permitindo o cálculo directo do caudal de ventilação em determinado espaço, expressão (2.23) [16]. As formulações têm por base o gradiente térmico ( $f_s$ ), acção do vento ( $f_w$ ) e a área de permeabilidade equivalente (*ELA - equivalent leakage area*), sendo este último determinado experimentalmente através de ensaios de pressurização ou medição directa das aberturas.

$$Q = s \cdot ELA_e \quad (2.26)$$

Onde,

$$s = (f_s^2 \cdot \Delta T + f_w^2 \cdot v^2)^{0,5}$$

$$f_s = \left( \frac{1 + \frac{R}{2}}{3} \right) \cdot \left( 1 - \frac{X^2}{(2-R)^2} \right)^{1,5} \cdot \left( \frac{g \cdot h}{T_{int}} \right)^{0,5}$$

$$f_w = C(1-R)^{0,33} A \left( \frac{h}{10} \right)^B$$

$$R = \frac{ELA_t + ELA_p}{ELA}$$

$$X = \frac{ELA_t - ELA_p}{ELA}$$

Conversão do caudal de ar escoado com  $\Delta p = 50$  Pa, determinado a partir de ensaios de pressurização:

$$ELA_e = Q_e \cdot \left( \frac{\rho}{8} \right)^{0,5}; ELA_t = Q_t \cdot \left( \frac{\rho}{8} \right)^{0,5}; ELA_p = Q_p \cdot \left( \frac{\rho}{8} \right)^{0,5}$$

sendo,  $Q$  = caudal de ventilação ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  $ELA_e$  = área de permeabilidade equivalente do espaço de ensaio ( $cm^2$ );  $\Delta T$  = diferença de temperatura entre exterior e interior (K);  $v$  = velocidade do vento ( $m \cdot s^{-1}$ );  $g$  = aceleração da gravidade ( $9,81 m \cdot s^{-2}$ );  $h$  = altura de registo da velocidade do vento (m);  $T_{int}$  = temperatura interior (K);  $A$  e  $B$  = parâmetros em função do terreno, presentes no Quadro 2.9;  $C$  = parâmetro em função do nível de protecção, que se podem retirar do Quadro 2.10;  $ELA_t$  e  $ELA_p$  = área de permeabilidade equivalente associada ao tecto e pavimento ( $cm^2$ );  $Q_e$ ,  $Q_t$  e  $Q_p$  = caudal de ar escoado através do espaço, tecto e pavimento com  $\Delta p = 50$  Pa ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  $\rho$  = densidade do ar à temperatura interior ( $kg \cdot m^{-3}$ ).

Quadro 2.9 - Coeficientes relativos ao tipo de terreno. Modelo *LBL* melhorado. Adaptado de [16].

Tipo de terreno	Muito suave	Plano	Rural	Urbano	Centro urbano
A	1,30	1,00	0,85	0,67	0,47
B	0,10	0,15	0,20	0,25	0,35

Quadro 2.10 - Coeficiente relativo ao nível de protecção. Modelo *LBL* melhorado. Adaptado de [16].

Nível de protecção	Sem protecção	Ligeiro	Moderado	Elevado	Muito elevado
C	0,34	0,30	0,25	0,19	0,11

#### h) Modelo *LNEC*

O seguinte modelo assenta no estudo da ventilação pelo efeito chaminé e pela acção do vento. As formulações, simplificadas, permitem a fácil aplicação por parte dos projectistas [31].

A determinação do caudal de ar, gerado pelo efeito de gradiente térmico, entre duas aberturas iguais instaladas a alturas diferentes numa fachada pode ser determinada através da expressão (2.27).

$$Q = 0,16 \cdot A \cdot \sqrt{\frac{h}{2} \cdot \Delta T_{int-ext}} \quad (2.27)$$

sendo,  $Q$  = caudal de ar escoado entre aberturas ( $m^3 \cdot h^{-1}$ );  $A$  = área de uma abertura ( $m^2$ );  $h$  = distância vertical entre as aberturas (m);  $\Delta T_{int-ext}$  = diferença de temperatura entre o espaço interior e o ambiente exterior (K).

A determinação do caudal de ar, gerado pelo efeito de chaminé, entre dois conjuntos de aberturas instaladas a alturas diferentes numa fachada pode ser determinada através da expressão (2.28).

$$Q = 0,16 \cdot A \cdot \sqrt{\frac{h \cdot \Delta T_{int-ext}}{\frac{1}{A_e^2} + \frac{1}{A_s^2}}} \quad (2.28)$$

sendo,  $Q$  = caudal de ar escoado entre aberturas ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ );  $A$  = área de uma abertura ( $\text{m}^2$ );  $h$  = distância vertical entre as aberturas (m);  $\Delta T_{int-ext}$  = diferença de temperatura entre o espaço interior e o ambiente exterior (K);  $A_e$  e  $A_s$  = áreas das aberturas de entrada e saída ( $\text{m}^2$ ).

A determinação do caudal de ar, gerado pela acção do vento, entre aberturas instaladas em fachadas opostas pode ser determinada através da expressão (2.29).

$$Q = 0,6 \cdot A_{eq} \cdot U \sqrt{C_{pe} - C_{ps}} \quad (2.29)$$

sendo,  $A_{eq}$  = área total das aberturas ( $\text{m}^2$ );  $U$  = velocidade do vento ( $\text{ms}^{-1}$ );  $C_{pe}$  e  $C_{ps}$  = coeficiente de pressão à entrada e saída das aberturas, respectivamente (-).

#### *i) Modelo European Standard (EN 15242:2007)*

O método de cálculo, descrito na norma EN 15242:2007 [8], permite determinar o caudal de ventilação de qualquer tipo de edifício e do sistema de ventilação nele implementado, com excepção para as seguintes situações:

- edifícios com altura superior a 100 m;
- diferença de temperatura entre espaços interiores superior a 15°C;
- cozinhas industriais, e;
- ventilação em indústria de processos (indústria pesada).

Esta norma define os parâmetros e método de cálculo do caudal de ar de ventilação a utilizar em estudos e avaliações de eficiência energética, de qualidade do ar interior e de conforto térmico. Os valores determinados podem incluir infiltrações de ar através da envolvente e caudais de ar de ventilação gerados pelo sistema de ventilação tendo em consideração as suas características [8].

Existem três métodos propostos no cálculo dos caudais:

- directo, com abordagem simplificada no cálculo dos caudais de ventilação dos sistemas mecânicos. Este método é baseado nas características do sistema e condições exteriores, não dependendo das condições de pressão interior, permitindo desprezar a permeabilidade da ao ar da envolvente;
- iterativo, método utilizado quando não é possível desprezar a permeabilidade ao ar da envolvente, ou seja, é o método de cálculo para edifícios que integrem a ventilação natural no seu sistema, e;

- análise estatística, em que a determinação dos caudais de ventilação usuais é feita com base em resultados estatísticos definidos a nível nacional e de acordo com determinados requisitos.

O método iterativo, aplicado neste trabalho, consiste no cálculo de todos os caudais de ar gerados através de sucessivas iterações dada a dependência destes da pressão interior. Os caudais gerados são compostos por diversos parâmetros, como direcção e velocidade do vento, gradiente térmico, diferença de temperatura entre interior e exterior, nível de protecção ao vento, etc. O processo de iteração é concluído com o equilíbrio entre caudal de ar admitido e o exausto.

No Subcapítulo 6.2 é descrito, de forma pormenorizada, a aplicação deste modelo ao sistema de ventilação natural do edifício estudado.

### 3. CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO ESTUDADO

#### 3.1. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DO ESPAÇO ENVOLVENTE

O edifício estudado está situado em Lisboa na zona da Baixa Pombalina, Rua do Jardim do Tabaco e tem os n<sup>os</sup> 29, 31 e 33. Encontra-se num espaço urbano classificado pelo Plano Director Municipal de Lisboa como Área Histórica Habitacional, sendo ainda abrangido pela Zona de Protecção de Imóveis do IPPAR [32].

O edifício integra uma zona próxima ao Rio Tejo, com cota próxima do nível do mar e situa-se na base da maior das sete colinas de Lisboa, a Colina de São Jorge, Figura 3.1 a). O solo é maioritariamente ocupado com edificado de habitação e de serviços, não existindo espaços abertos (com excepção do estuário no quadrante sul) ou zonas de vegetação assinaláveis. Em geral, a altura dos edifícios não ultrapassa os 25 m.

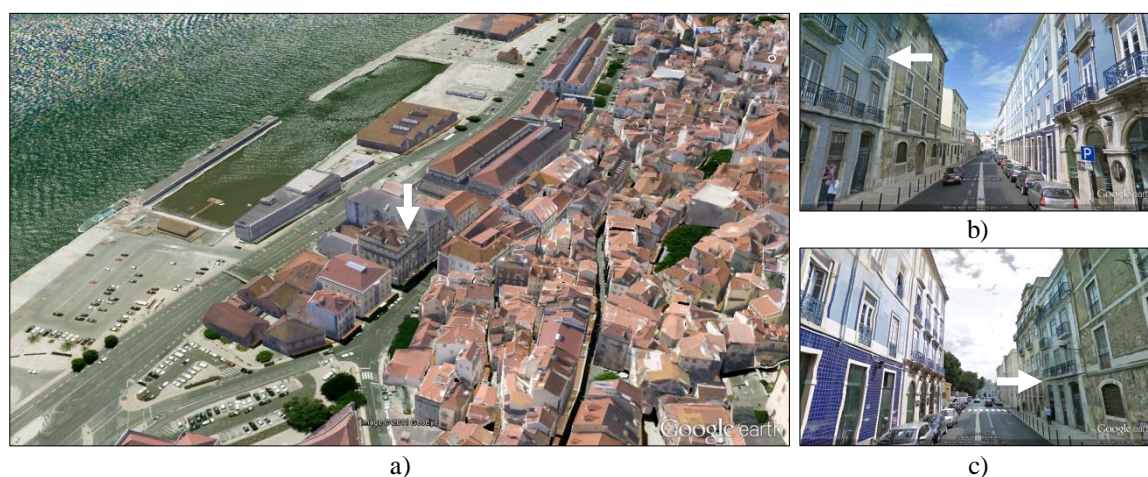


Figura 3.1 – Localização do edifício estudado. a) Proximidade do edifício ao estuário do Rio Tejo (distância ao rio: 150 m e cota acima do nível do mar: 6 m) e restante espaço envolvente. Edifício estudado e edifícios vizinhos na Rua Jardim do Tabaco (altura máxima dos edifícios de 25 m). b) Vista NE-SO. c) Vista SO-NE. Imagens: *Google earth*<sup>TM</sup> visualização: *3D* e *Street View*.

A fachada principal do edifício está orientada a Noroeste, para a Rua do Jardim do Tabaco, tendo um edifício situado em frente (n<sup>os</sup> 30 a 36) com cerca de 25 m de altura e um afastamento de 13 m. A Sudoeste, o edifício está confinado pelos edifícios n<sup>os</sup> 35 e 37 e a Nordeste confinado pelos edifícios n<sup>os</sup> 19 a 27, Figura 3.2 c). Estes dois edifícios têm, relativamente ao edifício em análise, maior área de implantação, altura cerca de 25 m e foram construídos aproximadamente durante o mesmo período.

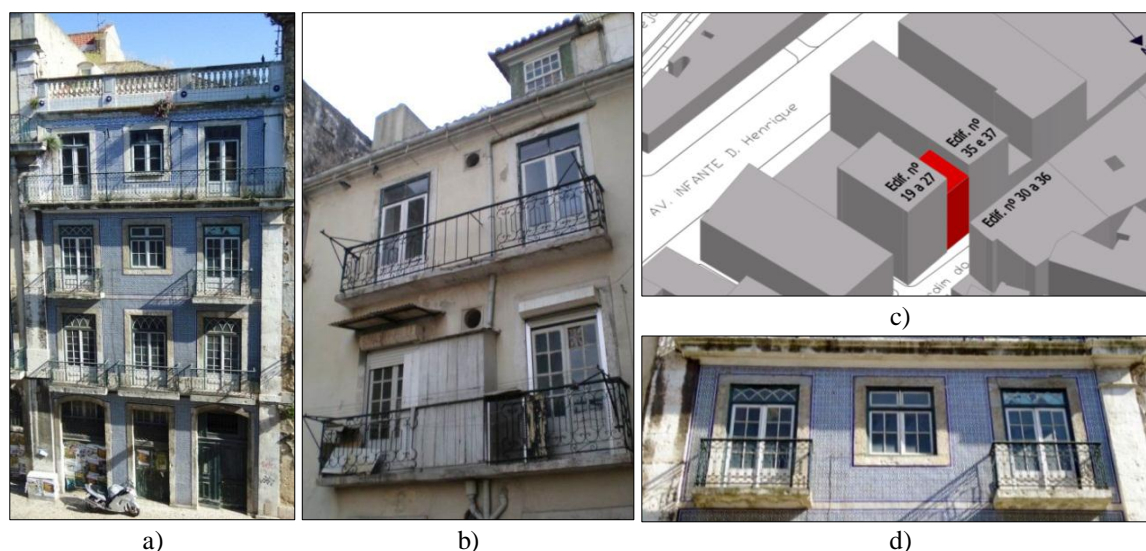


Figura 3.2 – Edifício estudado. a) Fachada principal, orientada a Noroeste (NO). b) Fachada posterior, orientada a sudeste (SE). c) Localização e envolvente ao edifício estudado. d) Fachada do piso 2.

### 3.2. CARACTERIZAÇÃO GERAL

O edifício estudado é um edifício misto de serviços e de habitação multifamiliar, sendo composto por rés-do-chão, destinado a serviços, 3 pisos elevados destinados a habitação, assim como um piso em águas furtadas convertido em habitação, constituindo-se em cada piso uma fracção autónoma, Figura 3.3 a). A área de implantação do edifício é, aproximadamente, de 110 m<sup>2</sup> e área útil de pavimento de 350 m<sup>2</sup>.

No piso térreo, a estrutura vertical, paredes exteriores, empenas e caixa de escadas, são em alvenaria de pedra ou tijolo formando um pé-direito de 4,50 m de altura. Nos pisos elevados, as paredes exteriores e empenas são em alvenaria de pedra e tijolo, a restante estrutura vertical e elementos horizontais são em madeira. A estrutura vertical é composta por paredes de frontal pombalino e de tabique. O pavimento de madeira com soalho simples é suportado por vigamentos em madeira perpendiculares às fachadas, com apoio nas paredes exteriores, empenas e paredes de frontal, constituindo a estrutura horizontal resistente.

O pé-direito dos pisos elevados é de 3,0 m, exceptuando o último piso de águas-furtadas onde a altura é variável (entre 1,0 e 3,0 m). No primeiro piso elevado, a fachada principal é composta por três janelas de sacada, sendo nos restantes pisos superiores por duas janelas de sacada e uma de peito. Em contraste com os edifícios adjacentes, toda a fachada principal (NO) é revestida com um painel de azulejos cerâmicos de cor branca e azul.

Na fachada posterior (SE), existem em cada piso duas janelas de sacada, uma na cozinha e outra no quarto 3, Figura 3.3 b). Na empena do saguão (SO) existe uma janela em guilhotina que se encontra fechada, não tendo uma contribuição significativa na ventilação da habitação.

Em seguida são descritas as dimensões relevantes para o estudo do sistema de ventilação do segundo piso do edifício, onde ocorreram os todos os ensaios experimentais.

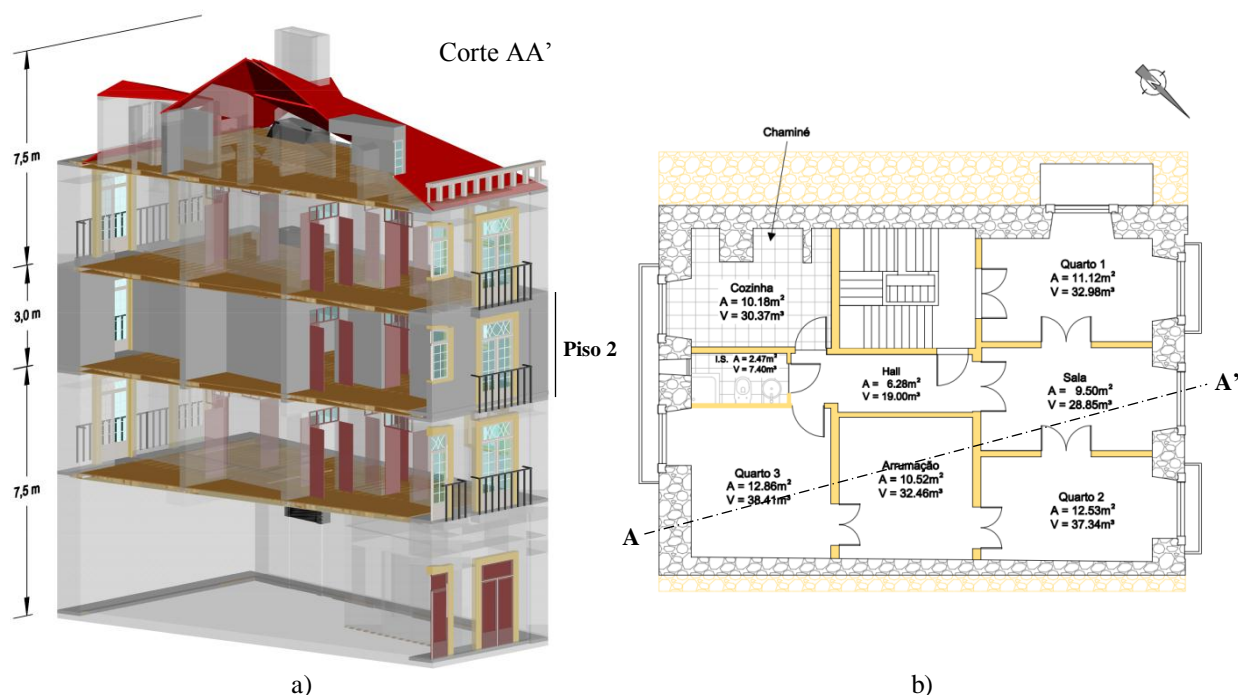


Figura 3.3 – Edifício e piso estudado. a) Imagem do edifício 3D e corte AA'. b) Planta da habitação estudada (piso 2).

Neste tipo de edifícios o sistema de ventilação, original, é exclusivamente natural, dispondo de uma chaminé de evacuação de grande secção na cozinha. Neste piso do edifício “Gaioleiro”, a chaminé tem uma abertura ou embocadura, na cozinha, de 1,20x0,50 m<sup>2</sup>, uma conduta vertical com secção 1,00x0,25 m<sup>2</sup> e 7,5 m de altura até à cobertura, elevando-se 1,00 m acima desta, Figura 3.3 e Figura 3.4. A ventilação da instalação sanitária é assegurada por uma janela basculante. A admissão de “ar novo” é efectuada pela abertura de janelas e pelas frinchas existentes na envolvente. Face às folgas existentes na caixilharia, presume-se que as frinchas sejam preponderantes na renovação de ar desta habitação, fundamentalmente devido à ventilação cruzada gerada pelas diferenças de pressão provocadas pela acção do vento sobre a envolvente. As restantes dimensões da fracção estudada, as principais e com maior relevância para o estudo do sistema de ventilação, encontram-se descritas em síntese no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Síntese das principais dimensões da habitação estudada (piso 2).

Divisão	Volume (m <sup>3</sup> )	Área de envolvente (m <sup>2</sup> )	Janelas		
			Descrição	Área (m <sup>2</sup> )	Comprimento das juntas móveis (m)
Quarto 1	33,0	7,94	1 JP; 1JS	4,11	17,70
Quarto 2	37,3	8,91	1 JS	2,65	10,65
Quarto 3	38,4	11,21	1 JS	2,65	10,65
Sala	28,9	7,44	1 JP	1,46	7,05
Arrumação	32,5	-	-	-	-
Ins. Sanitária	7,4	3,56	1 JB	0,13	1,43
Cozinha	30,4	8,88	1 JS	2,65	10,65
Hall	19,0	-	-	-	-
<b>Total</b>	<b>226,8</b>	<b>47,94</b>		<b>13,65</b>	<b>58,13</b>

Legenda: JP janela de peito; JS janela de sacada; JB janela basculante.



Figura 3.4 – Chaminé do edifício estudado. a) Vista geral. b) Abertura da chaminé (secção:  $1,20 \times 0,50 \text{ m}^2$ ). c) Conduta vertical da chaminé (secção:  $1,00 \times 0,25 \text{ m}^2$ ; altura: 7,50 m). d) Ventilador estático (altura acima da cobertura: 1,00 m).

O edifício encontra-se desabitado, não tendo sido objecto de qualquer obra de conservação ou reabilitação recente. Em todo o edifício é visível um avançado estado de degradação e com presumível influência na capacidade resistente do edifício. No primeiro piso elevado, os elementos de madeira das paredes de tabique que integram parte da caixa-de-escadas e da cozinha encontram-se deteriorados e apodrecidos, conduzindo ao abaulamento manifestado nos pavimentos dos restantes pisos superiores, Figura 3.5 b) e c). Nos outros pisos a degradação é fundamentalmente ao nível dos acabamentos com o destaque de reboco e estuque.

Em situações correntes, em especial para edifícios com esta tipologia, a permeabilidade ao ar dos pavimentos em madeira não é significativa. No entanto, em consequência da degradação do soalho e do abaulamento dos vigamentos, os pavimentos podem apresentar uma permeabilidade ao ar importante, Figura 3.5 a) e c). Este fenómeno foi devidamente avaliado na realização dos ensaios de pressurização e considerado neste estudo. Contudo, face às pequenas diferenças de pressão entre pisos, a sua influência na ventilação das fracções não será muito importante (Subcapítulo 5.1).

Observou-se também uma acentuada degradação nas janelas de madeira, nomeadamente nos perfis inferiores das janelas de sacada junto ao pavimento, que se manifestam em aberturas relevantes nas juntas móveis das janelas, Figura 3.5 d). Neste sentido, no estado actual da habitação, pre-

vê-se que as janelas sejam as componentes com elevada permeabilidade e com grande influência na permeabilidade global.

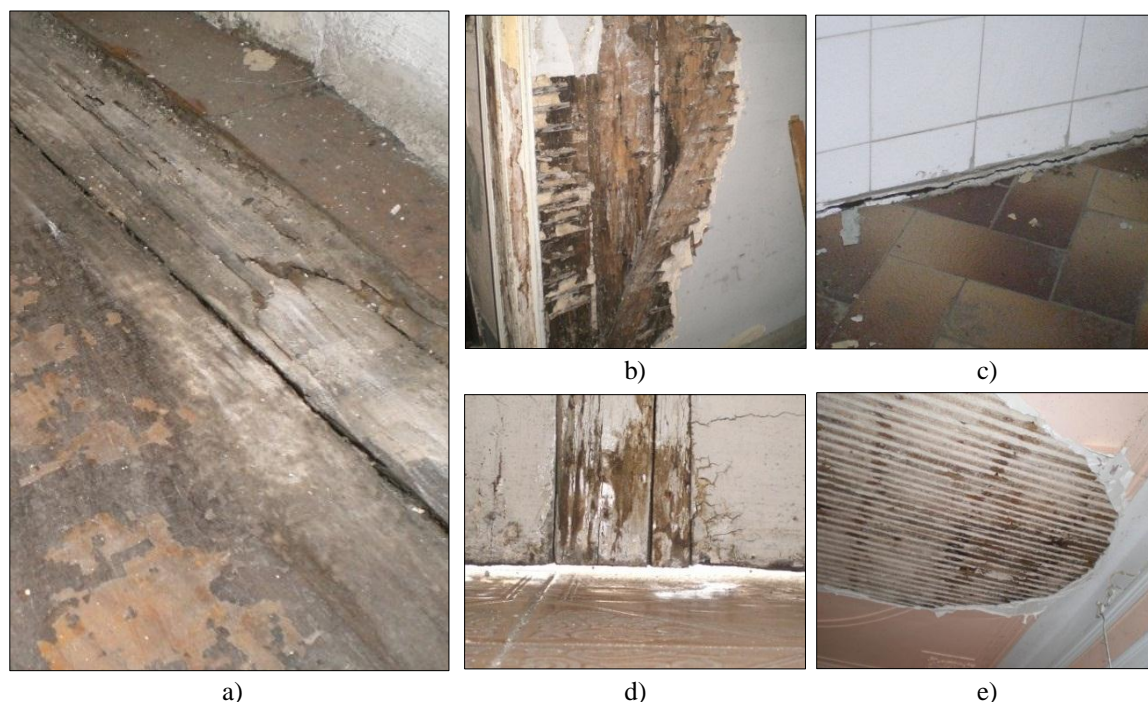


Figura 3.5 – Locais de maior degradação do edifício estudado. a) Frincha no pavimento devido a deterioração. b) Parede de tabique deteriorada no piso 1 (divisão entre cozinha e caixa-de-escadas). c) Frincha entre parede de tabique e pavimento de madeira devido abaulamento do pavimento do piso 2 (revestimento em azulejo e mosaico). d) Frincha entre o perfil inferior das janelas de sacada e a soleira. e) Destacamento do reboco do tecto.

### 3.3. CLIMA

#### 3.3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A cidade de Lisboa apresenta um clima mediterrâneo, caracterizado por um Verão quente e seco e pela concentração da maior parte da precipitação no período de Outubro a Abril. A proximidade marítima do estuário do Rio Tejo e outros factores geográficos têm, no clima da cidade, um efeito térmico moderador e um regime de ventos frequente. Além dos factores geográficos e topográficos, o clima urbano resulta também das características físicas da cidade, nomeadamente a morfologia urbana e da sua modificação, por exemplo, o aumento da densidade urbana e modificações de cobertura do solo.

No presente trabalho foram utilizados para a validação do modelo numérico (descrito no Subcapítulo 6.3) os valores registados na estação meteorológica situada no Cais-do-Sodré [33], situada a cerca de 1 km do edifício estudado e com nível de rugosidade semelhante, neste sentido não se procedeu à correcção ou extrapolação destes dados de acordo com o descrito na Secção 2.3.3.

Nas restantes análises, o presente trabalho tem uma abordagem orientada para o período de aquecimento das habitações em Lisboa, nomeadamente o período de 1 de Novembro a 10 de Abril (5,3

meses), no qual as perdas térmicas associadas à renovação de ar têm maior influência nas necessidades nominais de aquecimento. Neste sentido, este trabalho é suportado pelos valores do ano climático de referência de Lisboa, designadamente os valores médios horários da temperatura exterior, direcção e velocidade do vento.

Outro aspecto do clima urbano, cuja exposição se desenvolve, são as condições de ventilação, que influenciam não só o campo térmico urbano e a qualidade do ar mas também, e de maior relevância para o presente trabalho, a ventilação natural das habitações.

### 3.3.2. TEMPERATURA

O aspecto mais estudado do clima urbano é a ilha de calor urbano (IC), consistindo num microclima registando temperaturas mais elevadas comparativamente a áreas rurais circundantes. A ilha de calor é mais frequente de noite que de dia devido à maior calma atmosférica e do vento moderado [34]. Na cidade de Lisboa, a IC situa-se na zona da Baixa Pombalina, Figura 3.6 a). Este fenómeno induzido pelo Homem, para além da importância do seu estudo, tem implicações no conforto e saúde da população, consumo de energia, consumo de água e na qualidade do ar. O vento, particularmente com origem no oceano Atlântico e estuário do Rio Tejo, assume um importante desempenho no arrefecimento e arejamento da cidade, Figura 3.6 b) e c). A temperatura média anual ronda os 16°C, com mínimos a ocorrer durante os meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro (mínima média 8,2°C) e máximos nos meses de Julho a Setembro (máxima média 27,4°C) [35]. Nas habitações, a temperatura interior situa-se em 20°C e 25°C para, respectivamente, a estação de aquecimento e arrefecimento (valores médios e de acordo com as condições ambientes de conforto definidas regulamentarmente). Neste sentido, a temperatura no interior das habitações é frequentemente superior à temperatura exterior ao longo de todo o ano, o que permite assegurar o correcto funcionamento (ou sentido) do efeito de gradiente térmico no sistema de ventilação (circulação ascendente das massas de ar e exaustão para o exterior através de aberturas superiores ou chaminé).

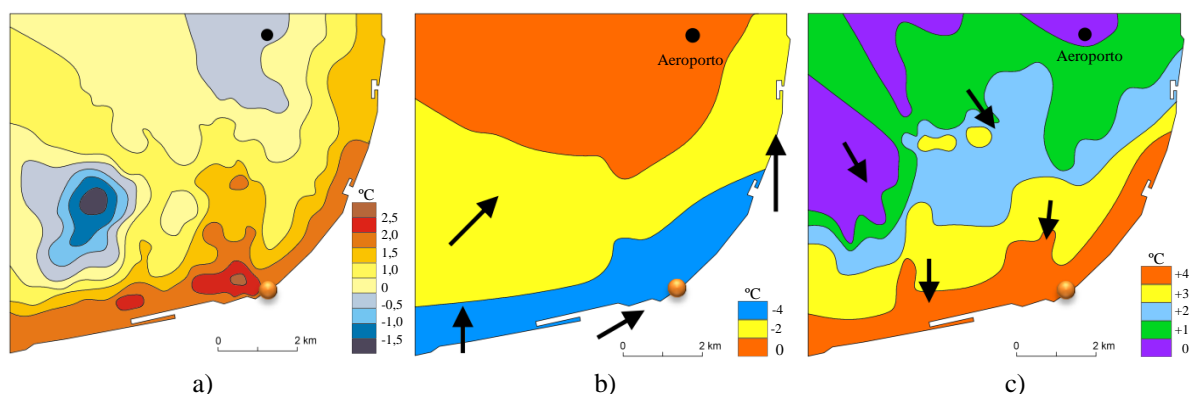


Figura 3.6 – Temperatura na atmosfera urbana de Lisboa: a) Ilha de calor nocturna (vento de Norte moderado). Desvio da temperatura em relação a Portela/Lisboa (Aeroporto): b) Brisas provenientes do estuário. c) Ventos provenientes do quadrante Norte. Adaptado de [36].

### 3.3.3. DIRECÇÃO DO VENTO E BRISAS

Nas camadas inferiores da atmosfera o comportamento do vento é um fenómeno físico, turbulento e irregular. Num estudo relativo aos regimes de vento e brisas do oceano Atlântico e do estuário do rio Tejo [37], são identificadas as diversas direcções do vento e brisas ao longo do ano e as suas variações diárias.

No Verão, de Junho a Agosto, durante o período da manhã na ausência de vento ou na presença de vento fraco, é observada a predominância de brisas provenientes do estuário (quadrante Sul), induzidas pela diferença de temperatura entre o estuário e a cidade, atrasando o pico de temperatura máxima na zona da Baixa Pombalina. Este fenómeno ocorre com relativa importância na ausência de vento forte para ventilação dos espaços urbanos. No período da tarde, o vento tem uma orientação segundo o quadrante Noroeste e de forte intensidade, a nortada. Neste período verifica-se um aumento de temperatura nas zonas próximas ao rio, como a zona da Baixa Pombalina, devido à condução das massas quentes de ar do centro para o sul da cidade.

No Inverno, de Dezembro a Fevereiro, a direcção dos ventos é variada, verifica-se no entanto maior frequência de vento com origem do quadrante Norte e pontualmente de Oeste e Nordeste, registando-se menor intensidade de vento relativamente à estação de Verão, Figura 3.7.

As estações intermédias Primavera e Outono, definidas pelos períodos de Março a Maio e de Setembro a Novembro, respectivamente, são denominadas estações de transição entre as estações principais, Verão e Inverno. Na Primavera, a direcção dos ventos é variada e a transição nos regimes de vento não é pronunciada, uma vez que no final do Inverno existe já um predomínio do vento de quadrante Noroeste, característico da estação de Verão. No Outono verifica-se a rotação da direcção do vento do quadrante Noroeste até ao quadrante Norte.

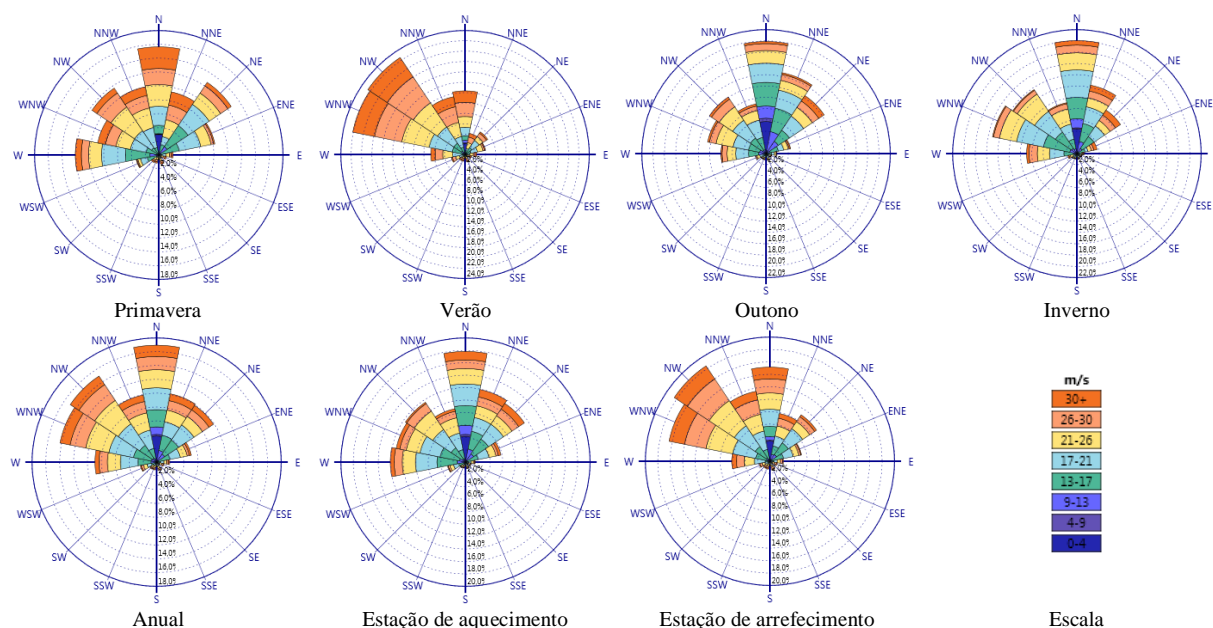


Figura 3.7 - Rosa-dos-ventos em diferentes períodos para a cidade de Lisboa. Dados climáticos publicados pelo Instituto de Meteorologia (1971-1980) e compilados pelo INETI [38], *Ecotec Wind Rose* [39].

Na Figura 3.7 são apresentadas as rosas-dos-ventos para diferentes períodos de acordo com os registos climáticos compilados pelo INETI [38] para a cidade de Lisboa. A estação de aquecimento da cidade de Lisboa (1 de Novembro a 10 de Abril) corresponde ao período do ano no qual o estudo do presente trabalho incide.

### 3.3.4. VELOCIDADE DO VENTO E BRISAS

O relevo, a rugosidade aerodinâmica e morfologia urbana afectam a velocidade do vento. Estes factores conferem ao vento e brisas alterações de rumo e de velocidade, por vezes aleatórias, principalmente nas zonas urbanas devido ao atrito gerado pelos edifícios. Apesar da diminuição significativa da velocidade média, as ruas e avenidas pode possibilitar a canalização de massas de ar (vento) e constituir importantes corredores na ventilação as zonas interiores das cidades. Na Figura 3.8 é apresentado o mapa de intensidade do vento ao longo do ano na cidade de Lisboa, onde se observa maiores velocidades de vento no período da tarde e na estação de Verão.

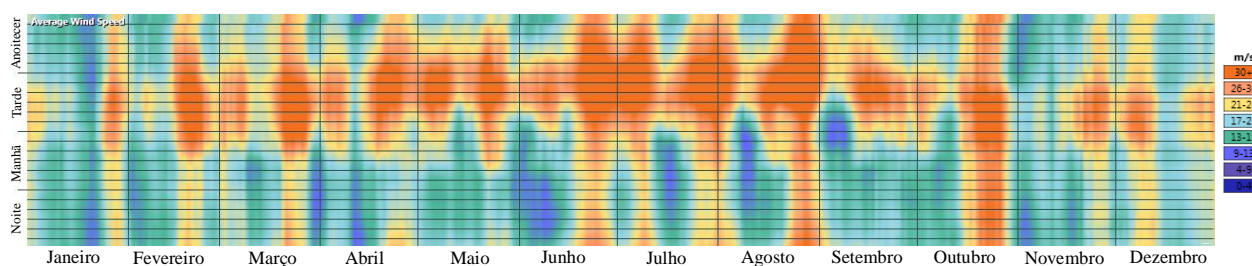


Figura 3.8 – Mapa da intensidade do vento ao longo do dia e ano para a cidade de Lisboa (médias horárias). Dados climáticos publicados pelo Instituto de Meteorologia (1971-1980) e compilados pelo INETI [38], *Ecotec Wind Rose* [39].

No estudo [40] foram determinadas as frequências das velocidades do vento na cidade de Lisboa, com base nos valores horários da velocidade e direcção do vento no período de 1971 a 1980. As séries de vento são estatisticamente assimétricas positivas, sendo a distribuição de *Weibull* uma das funções mais utilizadas na sua representação por se ajustarem adequadamente a estas séries [40]. Através desta distribuição é possível determinar os parâmetros de forma ( $k$ ) e parâmetros de escala ( $A$ ). Os valores de forma são adimensionais e o factor de forma representa um valor proporcional à velocidade média do vento.

Na Figura 3.9, em complemento com a Figura 3.8, observa-se uma maior frequência nas estações da Primavera e Verão de ventos com intensidade superior comparativamente ao Outono e Inverno.

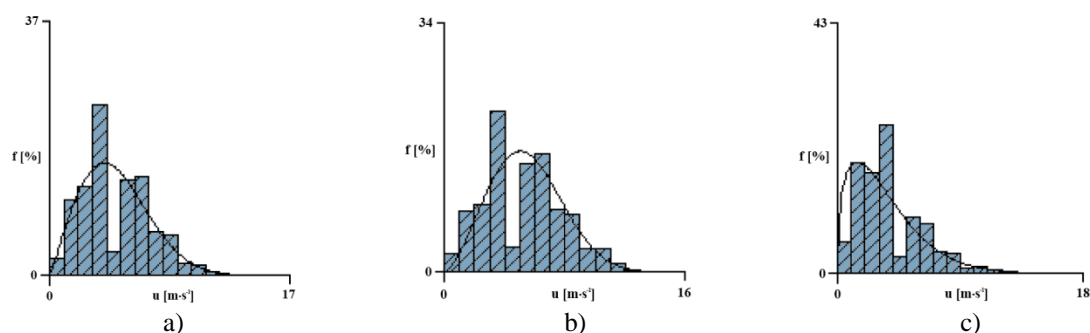


Figura 3.9 - Distribuições frequências no período de 1971-1980 em Lisboa (estação meteorológica Lisboa/Portela). a) Estação de Primavera:  $A = 5,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e  $k = 2,07$ . b) Estação de Verão:  $A = 6,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e  $k = 2,50$ . c) Estações de Outono e Inverno:  $A = 3,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e  $k = 1,36$ . [40].

Decorrente de estudos anteriores [35], foi definido um mapa de classes de ventilação da cidade de Lisboa, apresentado na Figura 3.10, que resulta do cruzamento entre a informação topográfica e a informação relativa à rugosidade aerodinâmica, definindo áreas com comportamento similar. O edifício estudado situa-se numa zona denominada por *frente ribeirinha*, que corresponde à zona da cidade de baixa altitude, junto ao Rio Tejo e directamente exposta à acção das brisas. Observa-se na Figura 3.10, a barreira formada pelo *planalto sul*, caracterizada pela elevada rugosidade, e pelas áreas de *vertente* (zonas de maior inclinação topográfica) que reduz a velocidade e altera a direcção do vento, principalmente o vento com origem do quadrante Norte e Oeste, sobre a *frente ribeirinha*. Assim, conclui-se que para a localização do edifício estudado, os ventos e brisas com origem do quadrante Este e Sul não sofrem alterações significativas de velocidade ou direcção. Neste sentido não se prevê ser necessário a correcção dos dados registados nas estações meteorológicas a montante do edifício (segundo as direcções indicadas). Nas restantes direcções, os valores de velocidade e direcção podem apresentar variações significativas, devendo ser corrigidos de acordo com a Secção 2.3.3.

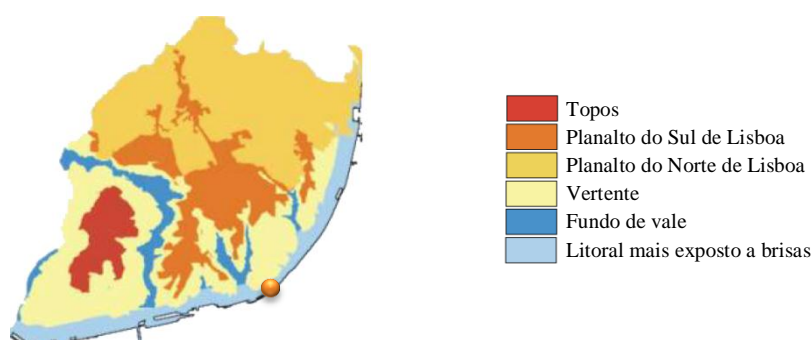


Figura 3.10 – Classes de ventilação em Lisboa [35].

A extrapolação, ou correcção, da velocidade do vento registado em estações meteorológicas (descrito na Secção 2.3.3) depende, entre outros condicionalismos, da correcta definição da rugosidade dos terrenos ou definição da espessura da camada limite atmosférica (CLA) e do expoente do perfil de velocidade do vento.

A determinada escala é possível estimar a rugosidade de um local específico, através da medição dos vários elementos que compõe as obstruções aos corredores de ar para a ventilação do espaço urbano. Segundo um estudo, relativo aos regimes de vento na região de Lisboa [36], foram determinadas classes de rugosidade nas diferentes zonas da cidade de Lisboa segundo as respectivas morfologias urbanas, Figura 3.11.

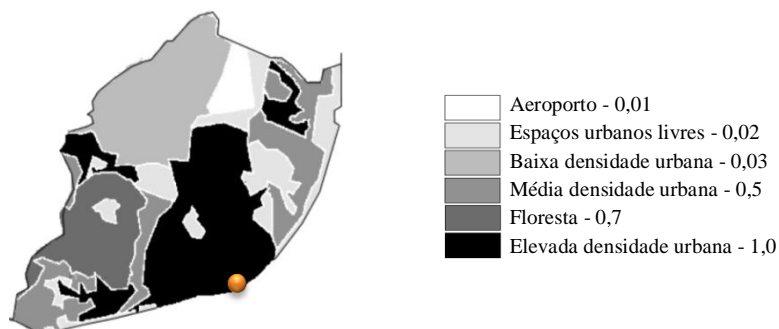


Figura 3.11 - Mapa de rugosidade de Lisboa nos anos 80 [36].

Na Figura 3.11 as zonas são classificadas segundo a rugosidade, parâmetro que é definido através de dados respeitantes ao edificado (densidade, altura, área da fachada, etc.) da década de 1980. Um aspecto a considerar nestes dados é o grande crescimento urbano, ocorrido nos últimos 30 anos, em diversas zonas na periferia da cidade de Lisboa (principalmente a Norte e a Este do centro da cidade). Em algumas situações, estas novas construções podem constituir barreiras, desviando canais de ar provenientes do quadrante Norte e Este, traduzindo-se na alteração das condições de ventilação no centro da cidade. Nos últimos trinta anos não se registaram alterações significativas na envolvente próxima ao edifício estudado, nomeadamente, a construção de edifícios novos, demolição de edifícios antigos ou alteração em altura de edifícios já existentes. O edifício estudado situa-se na periferia da Baixa Pombalina, próxima do estuário do Rio Tejo. Neste sentido, não é previsível a alteração ou influência significativa e directa dos novos conjuntos habitacionais, construídos após 1980 a Norte e Nordeste, nas condições naturais de ventilação urbana afectos à zona do edifício estudado, permitindo assim enquadrar correctamente as conclusões deste estudo [36] no presente trabalho.

Relativamente ao outro método de extrapolação da velocidade do vento (descrito na Secção 2.3.3), são apresentados no Quadro 3.2, em função do tipo de superfície, alguns dos valores característicos da espessura da camada limite atmosférica ( $\delta$ ) e do expoente do perfil de velocidade do vento ( $\alpha$ ). Como nas últimas décadas, não se registaram alterações significativas na morfologia da zona da Baixa, superfície da zona da Baixa enquadra-se num tipo de superfície *Suburbana* ( $\alpha = 0,28$ ), no entanto, devido à proximidade do edifício “Gaioleiro” ao estuário (superfície livre de obstáculos), justifica-se para o expoente do perfil ( $\alpha$ ) e da espessura da CLA um valor mais próximo do tipo de superfície *Rural com vegetação rasteira*.

Quadro 3.2 - Valores característicos da espessura da camada limite atmosférica e do expoente do perfil de velocidade do vento, em função do tipo de superfície.

<i>Tipo de superfície</i>	<i>Espessura da CLA</i> $\delta$ (m)	<i>Expoente do perfil</i> $\alpha$ (-)	Perfil de velocidade (Baixa) 
Marítimo	250	0,12	
Rural com vegetação rasteira	300	0,16	
Suburbana, floresta	400	0,28	
Urbana com edifícios de grande porte	500	0,40	
Baixa de Lisboa (1980) <sup>(1)</sup>	350	0,22	
Baixa de Lisboa (actualmente) <sup>(1)</sup>	400	0,31	

<sup>(1)</sup> Determinado através do perfil de velocidade do vento tipo potência, descrito em [36].

### *Resultados da medição da diferença de pressão nas fachadas*

A monitorização do diferencial de pressão ( $\Delta p$ ) entre o interior da habitação e ambiente exterior nas duas fachadas (orientadas a NO e SE), utilizando células de pressão, permitiu analisar a influência do vento, em função da sua intensidade e direcção, na variação dos valores de  $\Delta p$  e, consequentemente, na ventilação da habitação. O período de monitorização estendeu-se ao longo de 30 dias, entre 19 Abril e 18 Maio de 2011, registando em intervalos de 10 minutos o valor de  $\Delta p$  junto às duas fachadas. Neste período foram registados os valores de  $\Delta p$  segundo duas condições (mesmas condições que as definidas nos ensaios G1 e G2 dos ensaios de gases traçadores, descrito no Subcapítulo 4.3):

- *Condição 1*, todas as aberturas na envolvente encontram-se nas condições normais e habituais de utilização em caso de ocupação, ou seja, janelas fechadas e chaminé desobstruída, e;
- *Condição 2*, conduta da chaminé de exaustão da cozinha selada, estando as restantes aberturas nas mesmas condições do ponto anterior.

Apresenta-se, na figura seguinte (Figura 3.12), os resultados correspondentes à variação de  $\Delta p$  em cada fachada entre 24 e 30 de Abril, para a *Condição 1* e a velocidade do vento. A velocidade e direcção do vento foram registadas numa estação meteorológica próxima, no Cais-do-Sodré, não sofrendo qualquer correcção nestes valores dada a proximidade e semelhança topográfica entre esta e o edifício estudado.

Analisando os dias referentes à *Condição 1* (situação actual da habitação) na Figura 3.12, a fachada orientada a Noroeste (NO) apresenta, em média, maior variação de pressão e de valor positivo comparativamente à fachada oposta, ou seja  $\Delta p_{\text{fachada SE}} < 0$  e  $\Delta p_{\text{fachada NO}} > 0$ . Os valores positivos e negativos de  $\Delta p$  registados indicam que a ventilação ocorre, tendencialmente da fachada NO para a SE, dado que a massa de ar desloca-se de zonas de maior para menor pressão. A diferente proporcionalidade entre os valores registados nas fachadas pode ser explicada analisando a Figura

3.13 onde é apresentado o registo da intensidade do vento e das variações de  $\Delta p$ , nas fachadas NO e SE, para a *Condição 2* (condução da chaminé selada) no período entre 11 e 18 de Maio.

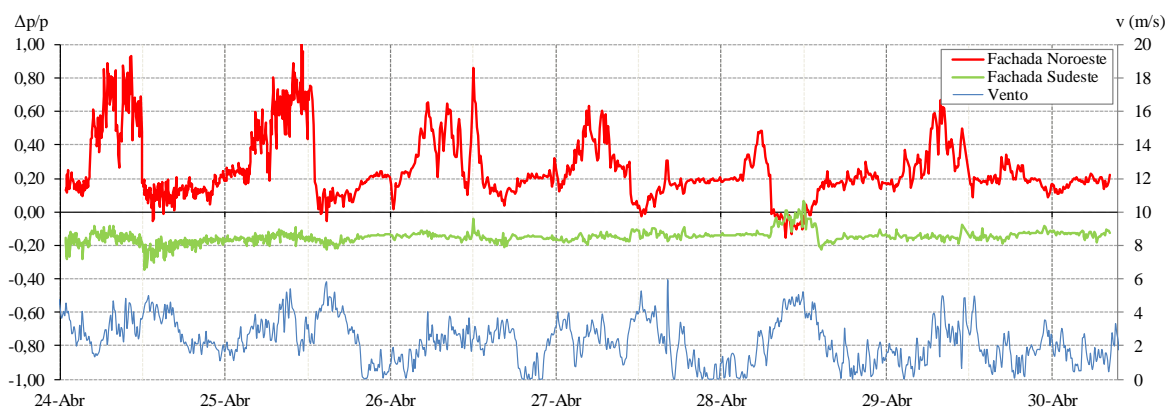


Figura 3.12 - Registo dos valores do diferencial de pressão entre interior e exterior nas duas fachadas, para a *Condição 1*, e a velocidade do vento registada numa estação meteorológica próxima.

Na Figura 3.13, pode-se observar a simetria e proporcionalidade segundo o eixo horizontal ( $\Delta p \approx 0$  Pa), ou seja, o desenvolvimento ascendente de uma curva coincide com o movimento descendente da outra, ao contrário do apresentado na Figura 3.12.

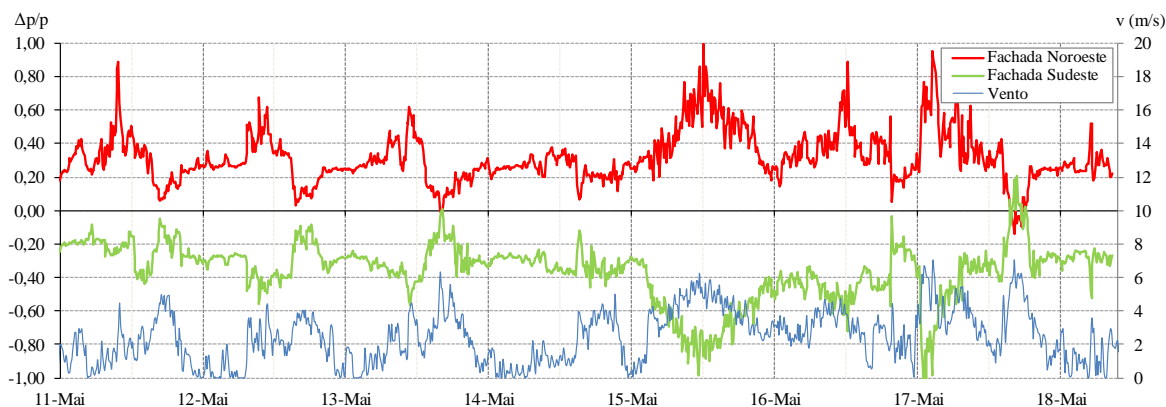


Figura 3.13 - Registo dos valores do diferencial de pressão entre interior e exterior nas duas fachadas, para a *Condição 2*, e a velocidade do vento registada numa estação meteorológica próxima.

Através das duas análises anteriores, depreende-se que o funcionamento da chaminé pode justificar a diferença registada entre a Figura 3.13 e Figura 3.12, apresentando uma acção de exaustão de ar na ventilação da habitação e de redução da pressão interior na zona da fachada SE. Nestas duas figuras, é visível a relação próxima entre o desenvolvimento das curvas  $\Delta p/p$  e a velocidade do vento. Pela importância da acção do vento na ventilação natural da habitação, procedeu-se ao estudo pormenorizado da sua influência na ventilação do edifício em estudo, apresentado no ANEXO C. Neste anexo é feita a análise para as *Condições 1* e *2* (idênticas às condições de ensaio G1 e G2 dos gases traçadores), a influência do vento nos valores registados de  $\Delta p/p$  através dos valores da velocidade do vento segundo as principais direcções, permitindo ainda perceber a acção de protecção dos vários obstáculos que compõem a envolvente do edifício estudado.

### 3.3.5. ESCOAMENTO DO VENTO EM TORNO DO EDIFÍCIO E COEFICIENTES DE PRESSÃO

Devido à geometria do edifício estudado e ao seu enquadramento urbano, a utilização dos coeficientes de pressão correntemente adoptados como no RSA (Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes [41]) afigura-se de elevada incerteza. Para auxiliar na análise e percepção do efeito proporcionado pela envolvente no escoamento do vento em torno do edifício, recorreu-se a uma aplicação de simulação dinâmica dos fluidos computacional (*CFD - Computational fluid dynamics*), *Vasari Ecotect Wind Tunnel Analysis* [39]. Esta aplicação permite a modelação tridimensional de toda a área envolvente (edifícios e topografia) e simular o escoamento do vento segundo várias direcções. Estas simulações permitem unicamente observar o comportamento do vento, não sendo determinados quaisquer parâmetros. Na Figura 3.14 destaca-se a elevada protecção do edifício, contudo, para a direcção Norte e Sudeste verifica-se maior incidência do vento sobre as fachadas Noroeste e Sudeste, respectivamente.

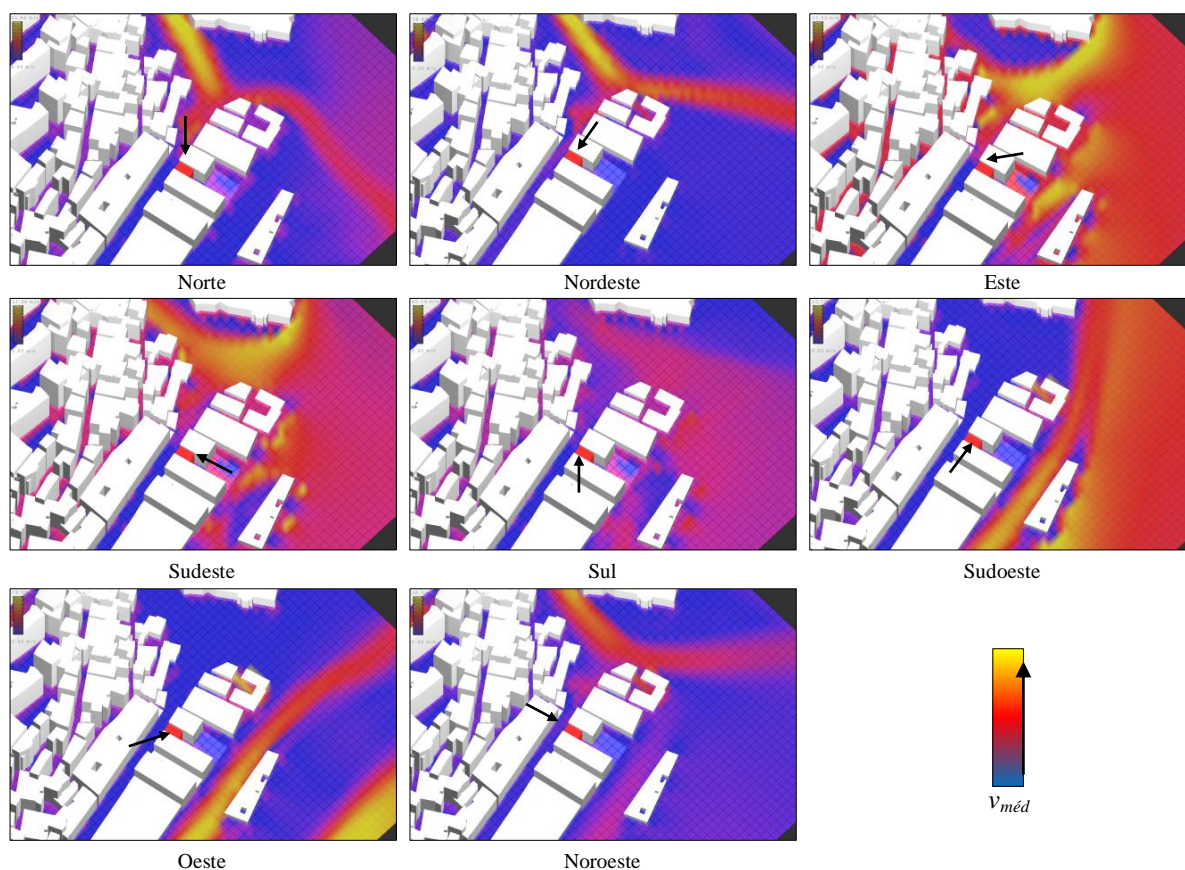


Figura 3.14 - Modelação da área envolvente ao edifício estudado (a vermelho) e simulação em túnel de vento do comportamento do vento segundo várias direcções. *Vasari Ecotect Wind Tunnel Analysis* [39].

A interacção entre o vento e os edifícios, ou outros obstáculos, gera, pelo seu escoamento, pressões estáticas de valor superior ou inferior à pressão atmosférica. Nas superfícies expostas ao vento incidente são geradas pressões positivas, enquanto as pressões negativas (depressões) ocor-

rem em superfícies com orientação oposta, ou próxima, à direcção do vento. Na cobertura, as pressões e depressões dependem, além da sua orientação, da inclinação das águas.

Os coeficientes de pressão ( $C_p$ ), sendo independentes da velocidade do vento para o regime turbulento, permitem relacionar a pressão estática na superfície face à velocidade do vento segundo cada direcção do vento e localização espacial na superfície do edifício. Estes valores são influenciados por diversos parâmetros, destacando-se a direcção do vento, orientação da fachada, geometria do edifício, pormenores construtivos, topografia, rugosidade e nível de exposição ao vento. Devido à grande complexidade e variabilidade destes parâmetros, a determinação analítica dos efeitos envolvidos através de coeficientes de pressão é muito difícil. Deste modo, existem inúmeros estudos para a determinação destes coeficientes, sob diversas geometrias e dimensões de edifícios. Usualmente estes valores são determinados directamente através de ensaios de escala real e de escala reduzida em túneis de vento. No entanto, existem actualmente aplicações informáticas de simulação que permitem determinar estes coeficientes de forma simples, económica e expedita, como a aplicação *Cp Generator* [42].

O edifício estudado encontra-se confinado por dois edifícios e o seu conjunto assemelha-se a um edifício com formato em “U”. A acção do vento sobre edifícios com esta geometria tem claramente valores de  $C_p$  distintos dos edifícios isolados de planta quadrada ou rectangular, indicados em bibliografias, regulamento e normas [43]. Pela importância e influência dos valores dos coeficientes de pressão estática nos estudos de ventilação e face à impossibilidade de realizar ensaios em túnel de vento, é conveniente estimar rigorosamente os valores de  $C_p$  envolvidos e especificamente para o edifício “Gaioleiro” em questão.

Os valores de  $C_p$  foram determinados através do programa de simulação *Cp Generator*. Foi ainda efectuada uma comparação destes valores face aos valores obtidos em ensaios de túnel de vento de edifícios com forma em “U” [44] para a fachada Sudoeste (SE) e, para a fachada principal (NO) efectuiu-se a comparação com os valores definidos para edifícios isolados de planta rectangular [45].

#### *a) Determinação dos coeficientes de pressão ( $C_p$ ) devido à acção do vento*

O programa de simulação *Cp Generator* permite estimar os coeficientes pressão nas fachadas e cobertura de edifícios com geometria simples e em bloco. No *input* deste programa é modelada a situação estudada, definindo as coordenadas, dimensões e orientações do edifício e obstáculos, como apresentado na Figura 3.15 a) e b). Permite ainda definir vários valores de rugosidade do terreno segundo diferentes orientações, Figura 3.15 c).

No *output* são especificados os valores de  $C_p$  para determinados pontos nas fachadas e cobertura, segundo todas as direcções do vento. Para o edifício estudado foi determinado os coeficientes de pressão na zona intermédia da fachada de cada piso (nas duas fachadas orientadas a Noroeste e Sudeste) e os coeficientes junto ao ventilador estático (fumeiro), imagem apresentada no Quadro

3.3. A modelação do edifício, obstáculos e características da envolvente (*input*) tal como os valores de  $C_p$  obtidos (*output*) encontram-se descritos no ANEXO D.

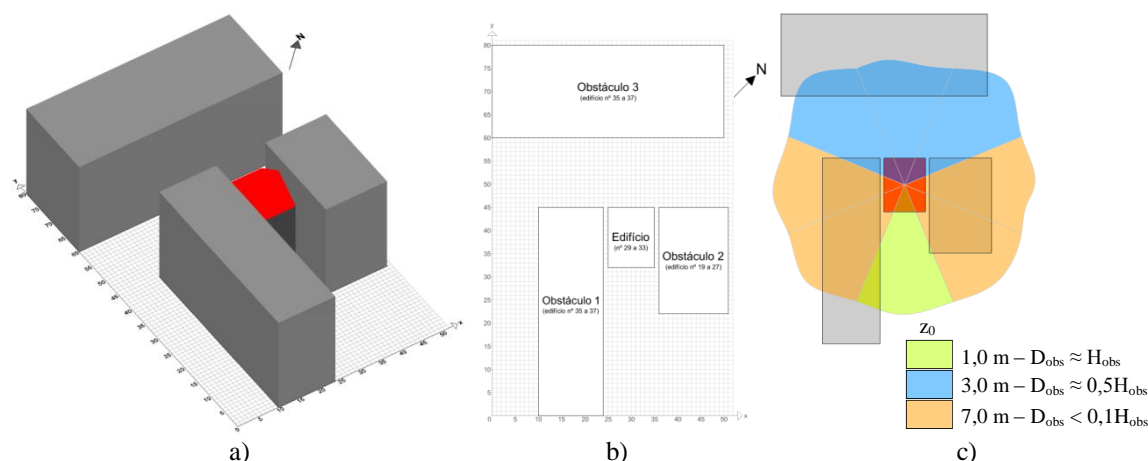
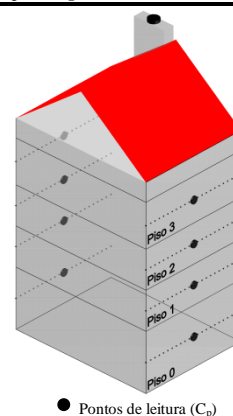


Figura 3.15 - Modelação utilizada no programa de simulação *Cp Generator* do edifício estudado e obstáculos. a) Obstáculos definidos na modelação. b) Posicionamento dos edifícios. c) Definição das rugosidades segundo as várias direcções ( $D_{obs}$ : distância do edifício ao obstáculo e  $H_{obs}$ : altura do obstáculo).

Uma das limitações deste programa é a dificuldade em estimar os valores de  $C_p$  resultantes do efeito de protecção de obstáculos muito próximos, como os edifícios adjacentes (Figura 3.15 b): *Obstáculo 1* e 2). Assim, foi necessário definir um espaçamento entre elementos contíguos de pelo menos 1,0 m, permitindo ultrapassar esta limitação sem no entanto induzir alterações significativas no modelo e nos resultados. No Quadro 3.3 são apresentados os coeficientes de pressão devido à acção do vento para o edifício agregando as várias características da envolvente.

Quadro 3.3 - Coeficientes de pressão estimados através do programa de simulação *Cp Generator*.

Piso	Direcção do vento ( $\alpha$ ) <sup>(1)</sup>								
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	
Fachada NO	3	+0,14	+0,16	-0,27	-0,12	-0,24	-0,23	-0,30	-0,05
	2	+0,14	+0,16	-0,26	-0,12	-0,23	-0,23	-0,30	-0,05
	1	+0,13	+0,14	-0,26	-0,12	-0,22	-0,22	-0,26	-0,04
	0	+0,11	+0,12	-0,24	-0,13	-0,20	-0,22	-0,22	-0,03
Fachada SE	3	-0,21	-0,20	-0,04	+0,18	+0,73	+0,03	-0,28	-0,26
	2	-0,21	-0,20	-0,04	+0,18	+0,69	+0,03	-0,28	-0,26
	1	-0,21	-0,20	-0,04	+0,16	+0,54	+0,02	-0,27	-0,25
	0	-0,20	-0,21	-0,04	+0,13	+0,39	+0,00	-0,27	-0,24
Cobertura ( $i = 30^\circ$ )		-0,63	-0,19	-0,17	-0,15	-0,85	-0,17	-0,29	-0,36



<sup>(1)</sup> A direcção do vento é definida de acordo com o ângulo formado com a perpendicular à fachada NO, Figura 3.16 a).

*b) Verificação da conformidade os valores de  $C_p$  obtidos pelo *Cp Generator**

Relativamente ao estudo realizado em túnel de vento, foi simulada a acção do vento segundo as principais direcções sobre edifícios de dez pisos com formato em L e U [44]. Foram utilizados modelos reduzidos à escala 1:100 para a quantificação das pressões em diversos pontos das faces interiores (faces em ensaio) através de sensores de pressão. Este estudo teve por objectivo deter-

minar unicamente os coeficientes de pressão nas faces interiores. Os coeficientes de pressão, apresentados através de isócronas de  $C_p$  ao longo da superfície das faces, são determinados pelo cálculo dos valores médios ponderados correspondentes a cada piso, Figura 3.16 b) e c).

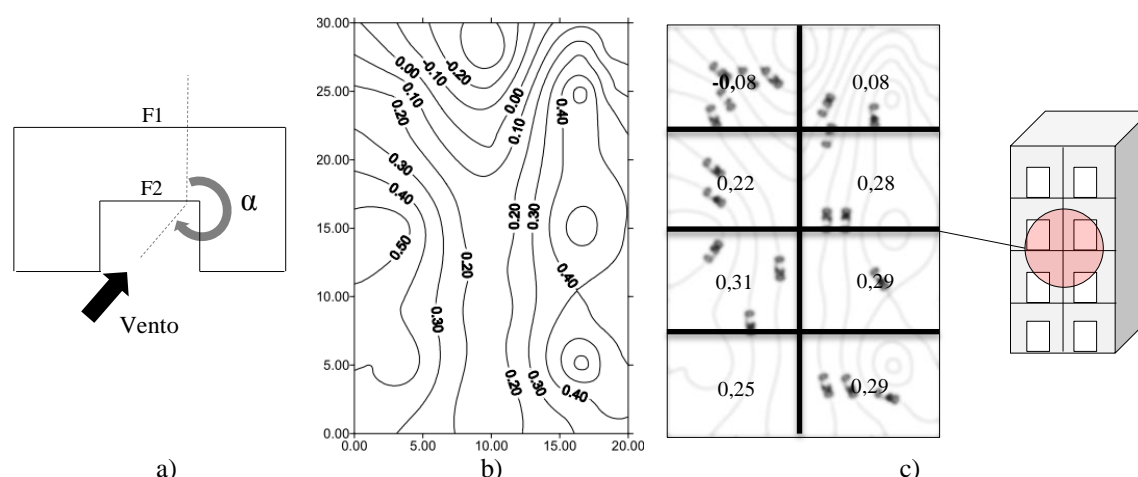


Figura 3.16 - Exemplo da determinação dos valores  $C_p$  na fachada F2, para vento com direcção incidente  $\alpha = 225^\circ$ . a) Definição do ângulo  $\alpha$ . b) Exemplo da distribuição do coeficiente de pressão ao longo da superfície da fachada F2. c) Valores médios estimados de  $C_p$  e enquadramento ao edifício estudado.

Em seguida, no Quadro 3.4, são apresentados os valores obtidos para a fachada posterior (F2), que corresponde à fachada SE do edifício “Gaioleiro” estudado, em função das principais direcções do vento e do nível de protecção do edifício ao vento. Os valores de  $\alpha$  correspondem ao ângulo formado, no sentido horário, entre a perpendicular da fachada principal (F1) e a direcção do vento, como indicado na Figura 3.16 a).

Os valores determinados neste estudo correspondem ao nível de protecção *Aberto*. Neste sentido, os restantes níveis de protecção (*Normal* e *Protegido*), indicados no Quadro 3.4, foram estimados de acordo com a influência do aumento do nível de protecção nos valores de  $C_p$  com base nos valores apresentados em [16].

Quadro 3.4 - Coeficientes de pressão de edifícios em U, fachada SE. Adaptado de [44].

Nível de protecção	Piso	Direcção do vento ( $\alpha$ )							
		0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Aberto	3	-0,63	-0,40	-0,68	0,00	+0,29	0,00	-0,68	-0,40
	2	-0,57	-0,40	-0,67	+0,25	+0,66	+0,25	-0,67	-0,40
	1	-0,54	-0,40	-0,68	+0,30	+0,72	+0,30	-0,68	-0,40
	0	-0,50	-0,40	-0,63	+0,27	+0,60	+0,27	-0,63	-0,40
Normal	3	-0,27	-0,35	-0,69	0,00	+0,12	0,00	-0,29	-0,35
	2	-0,24	-0,35	-0,67	+0,03	+0,28	+0,04	-0,29	-0,35
	1	-0,23	-0,35	-0,68	+0,04	+0,31	+0,04	-0,29	-0,35
	0	-0,21	-0,35	-0,63	+0,03	+0,26	+0,04	-0,27	-0,35
Protegido	3	-0,13	-0,30	-0,17	0,00	+0,06	0,00	-0,14	-0,30
	2	-0,12	-0,30	-0,17	0,00	+0,14	+0,01	-0,14	-0,30
	1	-0,11	-0,30	-0,17	+0,01	+0,15	+0,01	-0,15	-0,30
	0	-0,11	-0,30	-0,16	0,00	+0,13	+0,01	-0,13	-0,30

Para a fachada principal do edifício, orientada a NO, os coeficientes utilizados para verificar a conformidade dos valores estimados pelo programa de simulação *Cp Generator* encontram-se descritos em vários textos da bibliografia dedicada a esta temática e possibilitam uma melhor adaptação às situações em estudo, relativamente aos valores enunciado em diversas normas. Os coeficientes indicados no Quadro 3.5 correspondem a edifícios isolados com planta rectangular [45].

Quadro 3.5 – Coeficientes de pressão de edifícios isolados com planta rectangular, fachada NO e cobertura. Adaptado de [45].

Nível de protecção		Direcção do vento ( $\alpha$ )							
		0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Aberto	Fachada	+0,50	+0,25	-0,50	-0,80	-0,70	-0,80	-0,50	+0,25
	Cobertura <sup>(1)</sup>	-0,60	-0,65	-0,70	-0,65	-0,60	-0,65	-0,70	-0,65
Normal	Fachada	+0,25	+0,06	-0,35	-0,60	-0,50	-0,60	-0,35	+0,06
	Cobertura <sup>(1)</sup>	-0,50	-0,60	-0,55	-0,60	-0,50	-0,60	-0,55	-0,60
Protegido	Fachada	+0,06	-0,12	-0,20	-0,38	-0,30	-0,38	-0,20	+0,12
	Cobertura <sup>(1)</sup>	-0,45	-0,46	-0,41	-0,46	-0,45	-0,46	-0,41	-0,46

<sup>(1)</sup>Cobertura com inclinação entre 10° e 30°. Estes valores são ainda sujeitos ao factor de correcção em função da altura do ventilador estático acima da cobertura (1,0 m), de acordo com [43] e definido da seguinte forma:

Altura acima da cobertura (m)	$dC_{p_h}$
< 0,5	0,0
0,5 – 1,0	-0,1
> 1,0	-0,2

Nos dois quadros anteriores (Quadro 3.4 e Quadro 3.5), os coeficientes de pressão encontram-se em função do nível de protecção das fachadas (*Aberto*, *Normal* e *Protegido*). A protecção é proporcionada pelos obstáculos que existem na zona envolvente, como os edifícios vizinhos. Deste modo, é determinado, em seguida, o nível de protecção das duas fachadas expostas ao vento e da cobertura do edifício de acordo com a norma EN 13465:2004 [43].

#### - Determinação do nível de protecção do edifício ao vento

O edifício encontra-se protegido por um obstáculo se:

$$H_{obs} \geq 0,5 \cdot \min(H_{edif}; 15) \quad (3.1)$$

sendo,  $H_{obs}$  = altura do obstáculo mais próximo a montante em relação à direcção do vento (m);  $H_{edif}$  = altura do edifício estudado (m).

Para determinada direcção do vento, um obstáculo é definido por qualquer edifício ou outro elemento se:

$$B_{obs}/B_{edif} > 0,5 \quad (3.2)$$

sendo,  $B_{obs}$  = largura do obstáculo (m);  $B_{edif}$  = largura do edifício (m).

O nível de protecção do edifício devido ao obstáculo é dado pelo quociente  $D_{obs}/H_{obs}$ , Quadro 3.6, onde  $D_{obs}$  é a distância em metros entre edifício e obstáculo.

Quadro 3.6 – Níveis de protecção em função da distância entre elementos e altura do obstáculo.

Nível de protecção	$D_{obs}/H_{obs}$
Aberto	$> 4$
Normal	$1,5 - 4$
Protegido	$< 1,5$

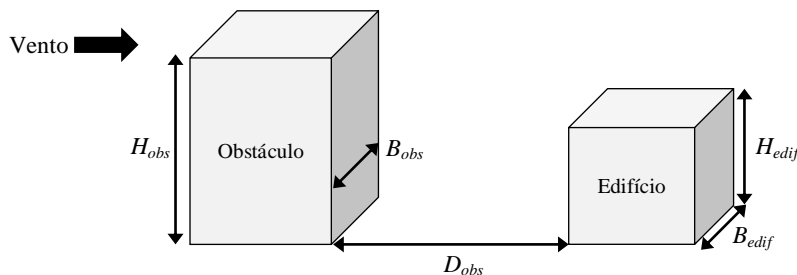


Figura 3.17 - Parâmetros utilizados na determinação do nível de protecção do edifício ao vento devido a obstáculo. Adaptado de [8].

No edifício estudado, o principal obstáculo para o vento com direcção Noroeste é formado pelo edifício nº 30. Este edifício integra um conjunto de edifícios com aproximadamente 25 m de altura ao longo de grande parte da Rua do Jardim do Tabaco, Figura 3.18 a): (1). Segundo a direcção Norte, os edifícios que conferem protecção à fachada NO têm uma altura inferior relativamente aos restantes (inferior a de 12 m), conferindo uma menor protecção ao vento, Figura 3.18 a): (2). A Sudeste existe também um obstáculo situado junto à Avenida Infante D. Henrique, com cerca de 10 m de altura, Figura 3.18 a): (3). Nas restantes direcções os edifícios adjacentes conferem um elevado nível de protecção.

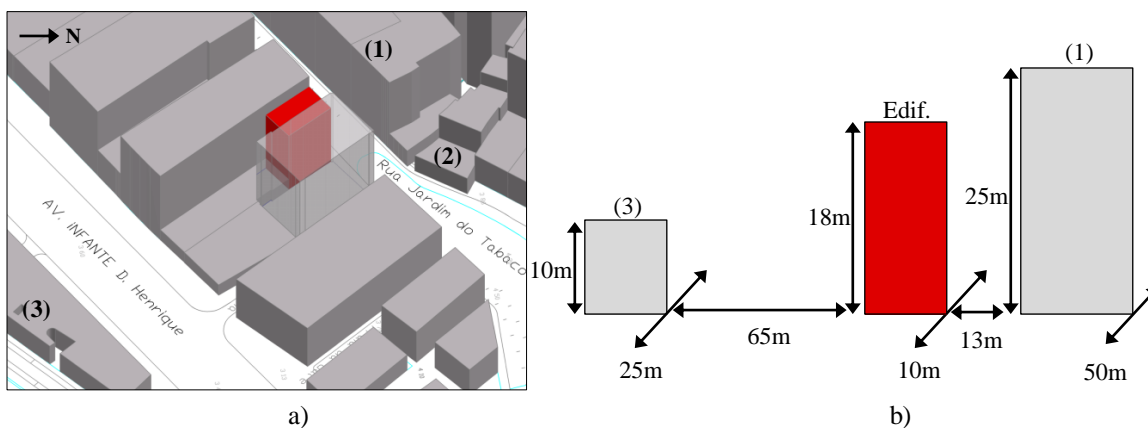


Figura 3.18 – Principais obstáculos ao edifício estudado. a) Vista em 3D do edifício em estudo (vermelho) e obstáculos. b) Dimensões utilizadas na determinação do nível de protecção do edifício segundo a orientação Noroeste e Sudeste.

Quadro 3.7 – Determinação do nível de protecção proporcionado pelos obstáculos sobre a fachada NO e SE segundo diferentes direcções do vento.

Direcção do vento	NO	N	SE	Restantes
$H_{obs}/B_{edif}$	2,5	0,6	1,0	-
$H_{obs} \geq 0,5 \cdot \min(H_{edif}; 15)$	$25 > 9$	$12 > 8$	$10 > 9$	-
$D_{ob}/H_{obs}$	$0,5 < 1,5$	$1,5 \leq 1,5 < 4$	$1,5 \leq 2,6 < 4$	-
Nível de protecção	Protegido	Normal	Normal	Protegido

Com base nestas conclusões, estabelece-se que as fachadas são *Protegidas* em todas as direcções de vento pelos obstáculos presentes, com excepção da direcção Sudeste e Norte, que têm um nível de protecção definido como *Normal*. Neste sentido, os coeficientes de pressão devido à acção do vento, estimados pelo programa *Cp Generator* (Quadro 3.3), encontram-se de acordo com os obtidos em ensaio de túnel [44] de vento para a fachada posterior (SE), Quadro 3.4, e com a bibliografia [45] para a fachada principal (NO), Quadro 3.5.



## 4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

### 4.1. ASPECTOS GERAIS

A presente dissertação pretende caracterizar experimentalmente o sistema de ventilação do edifício “Gaioleiro” estudado através de ensaios de pressurização e de gás traçador. Os ensaios de pressurização destinam-se a avaliar a permeabilidade ao ar das componentes que integram envolvente e assim suportar a estimativa da taxa de infiltrações de ar. Os ensaios de gás traçador destinam-se a medir a taxa média de renovação de ar, tendo, neste trabalho, sido avaliadas taxas de renovação de ar para a condição actual do edifício, para uma condição de melhoria da permeabilidade ao ar da envolvente e para a condição de ter sido instalado um exaustor na chaminé de exaustão da cozinha. Esta avaliação experimental permitirá suportar o desenvolvimento e validação do modelo de ventilação da habitação apresentado no Capítulo 6.

### 4.2. ENSAIO DE PRESSURIZAÇÃO

A caracterização da permeabilidade ao ar da envolvente da habitação do piso 2 e dos seus componentes de ventilação foi realizada através de ensaios de pressurização, em conformidade com a norma EN 13829:2000 [26] e com o descrito na Secção 2.4.2. Com estes ensaios pretende-se obter as curvas de pressão-caudal necessárias para implementar o modelo numérico do sistema de ventilação da habitação e enquadrar a permeabilidade ao ar deste edifício face a valores típicos de edifícios portugueses [23].

Através da vedação sucessiva de componentes de ventilação da envolvente é possível caracterizar a permeabilidade ao ar de cada um dos componentes e estimar o impacto da melhoria da permeabilidade ao ar das janelas ou o impacto da instalação de elementos que obstruam a chaminé.

Nestes ensaios são aplicadas diferenças de pressão sucessivas entre o espaço e o exterior com recurso ao equipamento porta ventiladora, Figura 4.1, e é medido o caudal de ar necessário para estabelecer essas diferenças de pressão. Na realização destes ensaios foram aplicadas diferenças de pressão entre 25 e 60 Pa.

Para assegurar uma diferença de pressão uniforme na envolvente da habitação, a entrada principal do prédio permaneceu aberta durante a realização dos ensaios, permitindo promover a igualdade de pressão da caixa-de-escada com o exterior.

As condições meteorológicas durante a realização dos ensaios devem enquadrar-se nos limites definidos na norma, de modo nem o efeito de chaminé, nem a acção do vento afectem de forma significativa os resultados dos ensaios de pressurização, ou seja, diferença de temperatura interior e exterior inferior a 28°C e a velocidade do vento inferior a 6 m·s<sup>-1</sup> [26].

Assim, a metodologia de ensaios é composta pelas seguintes fases:

- preparação da envolvente para os ensaios estabelecidos (por exemplo, vedação das juntas móveis das janelas, selagem da abertura da conduta da chaminé, etc.);
- instalação da porta ventiladora na porta de entrada da habitação;
- medição da temperatura do ar no interior da habitação e do ar no exterior;
- medição da diferença de pressão entre fachadas opostas;
- verificação das condições exteriores que possibilitem a realização dos ensaios;
- introdução das condições ambientais no software para a correcção dos caudais de ar para as condições de referência de 20°C e 1 atm.
- medição da diferença de pressão base (*baseline*);
- realização do ensaio em modo automático aplicando os patamares de pressão previstos, e;
- análise de resultados.

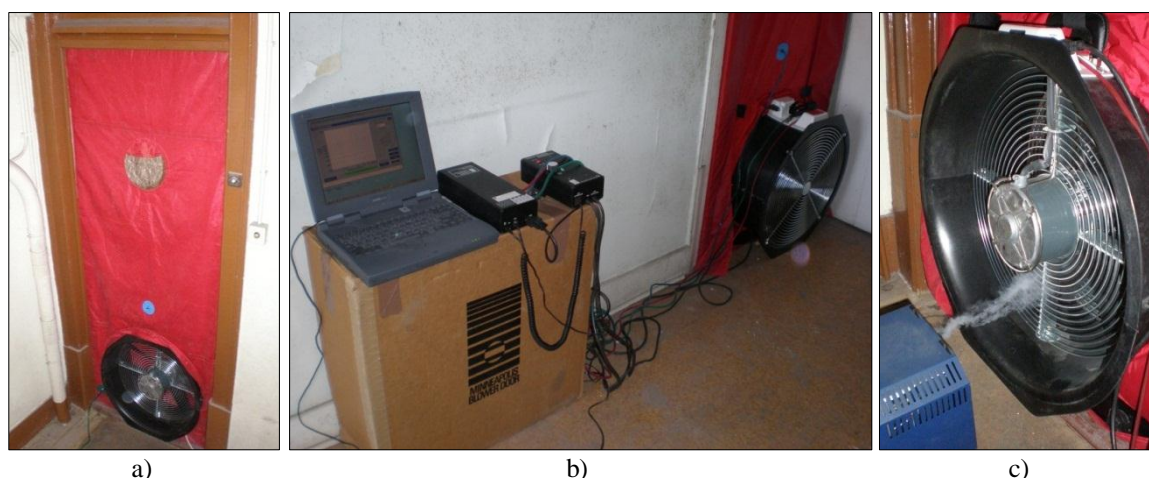


Figura 4.1 – Ensaio de pressurização. a) Porta ventiladora instalada (vista pelo exterior da habitação). b) Equipamento utilizado nos ensaios de pressurização e porta ventiladora (vista pelo interior). c) Utilização do gerador de fumo e porta ventiladora para a detecção de frinchas na envolvente.

Através da realização de ensaios sucessivos, com a vedação de diferentes elementos da envolvente, é possível obter os parâmetros característicos da permeabilidade ao ar da envolvente e dos seus componentes.

A determinação da permeabilidade ao ar, por exemplo, das caixilharias exteriores (janelas) consiste na realização de pelo menos dois ensaios, um de referência e outro sujeito à selagem das frinchas e juntas móveis das caixilharias. A subtracção dos caudais destes dois ensaios exprime a permeabilidade ao ar desta componente.

No âmbito deste trabalho pretende-se obter os seguintes dados:

- permeabilidade ao ar da habitação no seu estado actual (valor  $n_{50}$ );
- permeabilidade ao ar das caixilharias exteriores;
- permeabilidade ao ar do pavimento;
- permeabilidade ao ar do tecto, e;
- perda de carga da conduta da chaminé da cozinha.

Com o objectivo de determinar as características anteriores, foram realizados os seguintes ensaios de pressurização:

- ensaio S1, todas as aberturas na envolvente encontram-se nas condições normais e habituais de utilização em caso de ocupação, ou seja, janelas fechadas e chaminé desobstruída. Apenas foram seladas as aberturas de grande dimensão que não existiriam numa habitação ocupada, como envidraçados danificados, aberturas resultantes da degradação e ausência de sifonagem nas canalizações;
- ensaio S2, a conduta da chaminé da cozinha foi selada, sendo as restantes condições igual ao ensaio S1;
- ensaio S3, igual ao ensaio S2, tendo sido vedadas as frinchas e juntas móveis das caixilharias exteriores;
- ensaio S4, igual ao ensaio S3, tendo sido simultaneamente pressurizado o piso 3, e;
- ensaio S5, igual ao ensaio S3, tendo sido simultaneamente pressurizado o piso 1.

Dadas as frinchas existentes no pavimento e no tecto de madeira, foram realizados ensaios específicos (ensaios S3, S4 e S5) permitindo obter a permeabilidade ao ar desses dois elementos do segundo piso. Primeiro foi realizado um ensaio onde se encontram as fugas de ar através das frinchas do tecto e do pavimento (ensaio S3), Figura 4.2 a). Em seguida, recorrendo a uma segunda porta ventiladora são pressurizados simultaneamente e à mesma pressão os pisos 2 e 3, eliminando a ocorrência de fluxos de ar entre ambos (ensaio S4), ou seja, através do tecto do piso 2, Figura 4.2 b). Finalmente, efectuando a subtracção dos resultados desses dois ensaios é possível determinar a permeabilidade ao ar do tecto. Um procedimento semelhante foi adoptado na medição da permeabilidade ao ar do pavimento, o ensaio S5 (pressurização simultânea dos pisos 1 e 2).

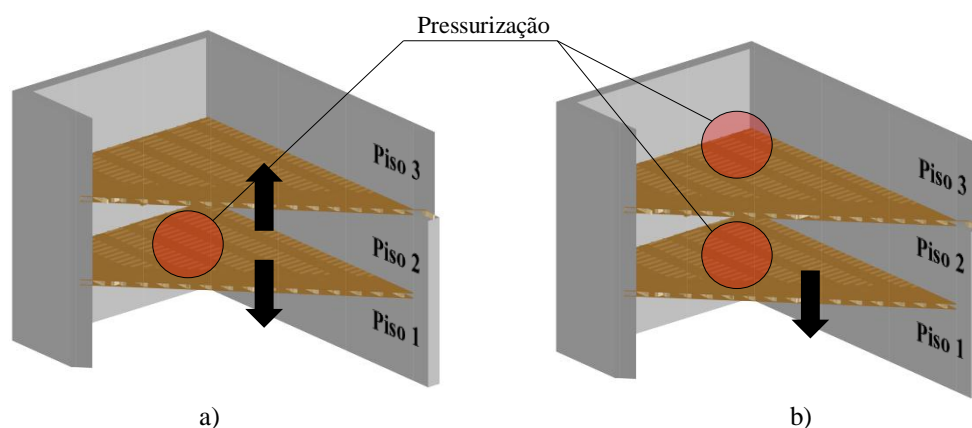


Figura 4.2 – Representação do esquema experimental utilizado na determinação da permeabilidade ao ar do tecto do piso 2 (S3-S4). a) Ensaio de pressurização S3. b) Ensaio de pressurização S4.

Cada um dos ensaios S1, S2 e S3 foram repetidos pelo menos seis vezes, composto por três ensaios de pressurização e outros três de despressurização. Com excepção dos ensaios S4 e S5, os quais foram realizados segundo o descrito no ponto anterior. As repetições permitem dissipar eventuais erros associados ao operador e evidenciar a repetibilidades dos resultados obtidos.

Nos vários ensaios foram elaborados relatórios de ensaio, com a descrição dos diversos dados e informações relevantes para o tratamento e análise dos resultados. O modelo do relatório elaborado para estes ensaios encontra-se exposto no ANEXO A.4.

Os resultados dos ensaios de pressurização são tratados automaticamente pelo *software* do equipamento utilizado (porta ventiladora) e seguem os princípios definidos no *Anexo C* da norma de ensaio [26].

### 4.3. ENSAIO DE GÁS TRAÇADOR

Na medição da taxa de renovação de ar foi utilizado o método do decaimento de um gás traçador de acordo com a norma EN ISO 12569:2000 [27] e descrito na Secção 2.4.3.

Neste ensaio pretende-se medir a taxa de renovação de ar para condições específicas de ensaio no que se refere à envolvente do edifício e para as condições meteorológicas existentes no momento da realização do ensaio. A análise comparativa dos resultados experimentais permitem avaliar o impacto de algumas soluções na taxa de renovação de ar e permitem suportar a validação do modelo de ventilação desenvolvido.

Na realização dos ensaios foi libertado dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) até à concentração máxima de, sensivelmente, 2500 ppm e posteriormente registado o decaimento da concentração de  $\text{CO}_2$  em intervalos de 1 minuto. Essas medições foram realizadas em dois compartimentos da habitação situadas em fachadas opostas Figura 4.3, permitindo identificar eventuais diferenças de ventilação entre espaços.

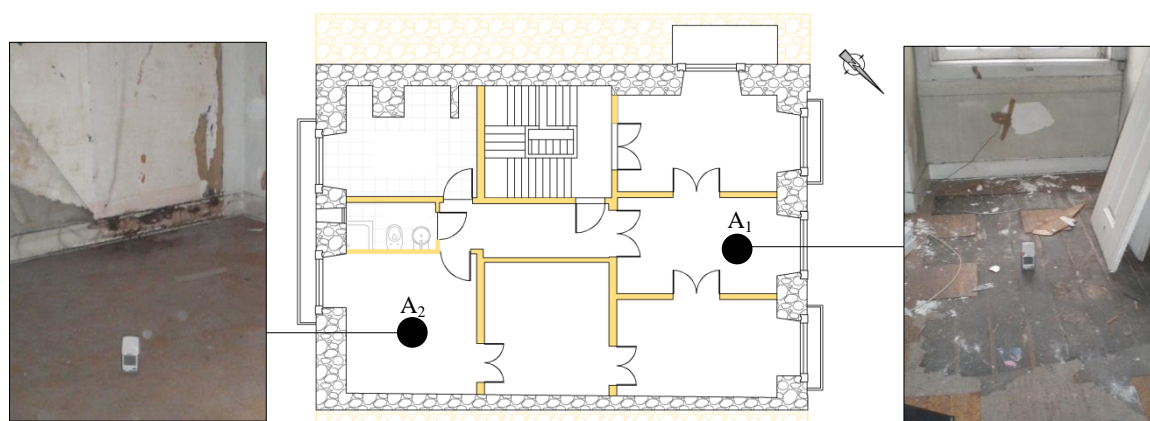


Figura 4.3 – Locais de instalação dos analisadores de gás  $\text{CO}_2$ : A<sub>1</sub>: sala, A<sub>2</sub>: quarto 3.

Para minimizar algumas fontes de erro, os ensaios foram realizados sem ocupantes no espaço e durante os ensaios todas as portas interiores encontravam-se abertas. Como fontes de incerteza subsiste a eventual absorção de  $\text{CO}_2$  pelos materiais de construção. No decurso destes ensaios foram medidas as condições ambientais interiores e exteriores, bem como a diferença de pressão nas fachadas NO e SE por meio de células de pressão.

Com o objectivo de avaliar experimentalmente a taxa de renovação de ar e o efeito da melhoria da permeabilidade ao ar da envolvente, foram realizados três ensaios:

- ensaio G1, todas as aberturas na envolvente encontram-se nas condições normais e habituais de utilização em caso de ocupação, ou seja, janelas fechadas e chaminé desobstruída. São seladas apenas as aberturas de grande dimensão que não existiriam numa habitação ocupada, como envidraçados danificados, aberturas resultantes da degradação e ausência de sifonagem nas canalizações;
- ensaio G2, a conduta da chaminé de exaustão da cozinha foi selada, sendo as restantes condições igual ao ensaio G1, e;
- ensaio G3, igual ao ensaio G2, sendo vedadas as frinchas e as juntas móveis das caixilharias exteriores.

Estes ensaios correspondem a uma avaliação do desempenho da habitação e servem de suporte à validação do modelo numérico exposto no Subcapítulo 6.3.

Numa fase prévia aos ensaios, foi estimada a massa de gás traçador ( $\text{CO}_2$ ) a injectar no espaço de ensaio de modo a registar as concentrações iniciais de sensivelmente 2500 ppm em cada ensaio. Considerando a massa molar do  $\text{CO}_2$  de  $44,01 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$  e, nas condições normais de temperatura e pressão, o volume molar de gás ideal de  $22,71 \text{ l}\cdot\text{mol}^{-1}$ , onde se obtém:

$$\frac{44,01}{22,71} \cdot 2500 \cdot 10^{-6} = 0,0048 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

Para o volume da habitação,  $227 \text{ m}^3$ , foi estimada a injeção de, sensivelmente, 1,1 kg de  $\text{CO}_2$  em cada ensaio.

Nos vários ensaios foram elaborados relatórios de ensaio, descrevendo os diversos dados e informações relevantes no tratamento e análise dos resultados. O modelo do relatório elaborado para estes ensaios encontra-se exposto no ANEXO A.5.

Os resultados dos ensaios são tratados de acordo com o *Anexo C* da norma de ensaio [27], determinando os intervalos de confiança das taxas de renovação de ar.



## 5. RESULTADOS DA AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA PERMEABILIDADE AO AR DA ENVOLVENTE E DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO

O principal objectivo da presente dissertação prende na caracterização experimental da permeabilidade ao ar da envolvente e do sistema de ventilação do edifício “Gaioleiro” estudado, destacando-se a determinação da:

- permeabilidade ao ar da envolvente e os componentes de ventilação da envolvente, através de ensaios de pressurização;
- perda de carga da conduta da chaminé do fogão, através de ensaios de pressurização;
- taxa de renovação de ar do habitação, através de ensaios de gás traçador, e;
- taxa de renovação de ar do habitação implementando algumas medidas de melhoria, através de ensaios de gás traçador.

### 5.1. PERMEABILIDADE AO AR DA ENVOLVENTE

#### 5.1.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Apresenta-se os resultados dos ensaios de pressurização e despressurização (S1, S2 e S3) no Quadro 5.1, no Quadro 5.2 e no Quadro 5.3. Nestes quadros são apresentados os valores de caudal de ar a 50 Pa ( $Q_{50}$ ), indicador  $n_{50}$ , valores de permeabilidade por unidade de área de pavimento ( $w_{50}$ ) e de permeabilidade por unidade de área de envolvente ( $q_{50}$ ) a 50 Pa. Os valores de referência, coeficiente  $C$  e expoente  $n$ , foram determinados a partir das curvas de pressurização e despressurização e caracterizam as equações de permeabilidade ao ar do edifício sob as respectivas condições de ensaio.

A exactidão dos valores apresentados encontra-se de acordo com a norma EN 13829:2000 [26], abaixo de 10 % de incerteza para os valores de referência ( $C$  e  $n$ ) e abaixo de 0,8 % para os valores derivados ( $n_{50}$ ,  $w_{50}$  e  $q_{50}$ ).

Os valores expostos compõem o *output* do programa informático utilizado nestes ensaios.

Quadro 5.1 - Resultados da campanha de ensaios de pressurização S1.

Parâmetros	Pressurização			Despressurização				Média
$Q_{50}$ ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )	5021	5026	5018	5322	5516	5540	5271	5245
±	0,5%	0,7%	0,4%	0,4%	0,2%	0,3%	0,5%	0,4%
$n_{50}$ ( $h^{-1}$ )	22,14	22,16	22,13	23,47	24,32	24,43	19,76	22,63
$w_{50}$ ( $m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ )	66,54	66,62	66,51	70,54	73,11	73,43	69,86	69,52
$q_{50}$ ( $m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ )	104,71	104,82	104,66	111,00	115,03	115,54	109,93	109,38
$C$	659,9	638,4	675,6	597,7	622,5	670,8	601,0	638,0
±	6,0%	8,9%	5,1%	5,1%	3,0%	4,0%	6,2%	5,5%
$N$	0,519	0,527	0,513	0,559	0,558	0,540	0,555	0,539
±	3,1%	4,4%	2,5%	2,3%	1,4%	2,0%	2,9%	2,7%
R	0,99725	0,99412	0,99795	0,99827	0,99941	0,99882	0,99739	0,99760

Quadro 5.2 - Resultados da campanha de ensaios de pressurização S2.

Parâmetros	Pressurização			Despressurização			Média
$Q_{50}$ ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )	3623	3564	3598	3762	3713	3945	3698
±	0,5%	0,6%	0,8%	0,4%	0,4%	0,5%	0,6%
$n_{50}$ ( $h^{-1}$ )	15,97	15,71	15,87	16,59	16,37	17,39	16,31
$w_{50}$ ( $m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ )	48,02	47,23	47,69	49,86	49,21	52,28	49,02
$q_{50}$ ( $m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ )	75,55	74,32	75,04	78,45	77,43	82,27	77,13
$C$	497,0	498,6	512,7	468,4	476,2	464,2	488,2
±	6,0%	8,5%	9,8%	5,1%	7,0%	6,4%	7,2%
$n$	0,508	0,503	0,498	0,533	0,525	0,547	0,518
±	3,1%	4,4%	5,2%	2,4%	2,9%	3,1%	3,6%
R	0,99708	0,99412	0,99206	0,99811	0,99822	0,99714	0,99570

Quadro 5.3 - Resultados da campanha de ensaios de pressurização S3.

Parâmetros	Pressurização				Despressurização			Média
$Q_{50}$ ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )	1584	1579	1582	1506	1653	1623	1598	1581
±	0,5%	0,4%	0,3%	0,3%	0,2%	0,3%	0,5%	0,3%
$n_{50}$ ( $h^{-1}$ )	6,98	6,96	6,98	6,64	7,29	7,14	7,02	6,97
$w_{50}$ ( $m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ )	20,99	20,92	20,97	19,96	21,92	21,47	21,11	20,95
$q_{50}$ ( $m^3 \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ )	33,03	32,92	33,00	31,41	34,47	33,84	33,32	32,97
$C$	102,3	110,2	122,2	124,0	114,4	113,7	110,2	114,6
±	6,9%	6,1%	4,7%	3,6%	3,6%	4,1%	5,3%	5,0%
$n$	0,700	0,681	0,655	0,638	0,683	0,673	0,668	0,671
±	2,6%	2,3%	1,8%	1,4%	1,3%	1,8%	2,5%	1,9%
R	0,99802	0,99833	0,99894	0,99934	0,99944	0,99952	0,99891	0,99881

Relativamente aos ensaios de pressurização realizados para determinar a permeabilidade ao ar do pavimento e do tecto (S4 e S5), a determinação dos valores de referência ( $C$  e  $n$ ) foram estimados a partir de três diferenciais de pressão (25, 35 e 50 Pa) e os correspondentes valores de caudal de ar registados ponto a ponto, como indicado no Quadro 5.4. O procedimento destes ensaios foi diferenciado dos restantes (S1, S2 e S4) devido à utilização simultânea de duas portas ventiladoras e, conseqüente, impossibilidade de se realizar os ensaios S4 e S5 de forma autónoma.

Quadro 5.4 - Resultados da campanha dos ensaios de pressurização S4 e S5.

Ensaio	$Q_{S4}$	$Q_{S5}$
25	879	641
35	1152	813
50	1377	1026
$C$	111,8	72,4
$n$	0,646	0,678
R	0,98197	0,99947

No Quadro 5.5, apresenta-se a síntese dos resultados dos ensaios, nomeadamente do indicador  $n_{50}$  e dos valores médios (pressão/depressão) do coeficiente  $C$  e expoente  $n$ . É estimada uma incerteza de 7%.

Quadro 5.5 - Síntese dos principais resultados obtidos nos ensaios de pressurização.

	S1	S2	S3	S4	S5
$n_{50}$ ( $h^{-1}$ )	22,6	16,3	7,0	6,1	4,6
$Q = C \Delta p^n$	$638,0 \Delta p^{0,54}$	$488,2 \Delta p^{0,52}$	$114,6 \Delta p^{0,67}$	$111,8 \Delta p^{0,65}$	$72,4 \Delta p^{0,68}$
$R$	0,9976	0,99579	0,99881	0,98197	0,99947

### 5.1.2. ANÁLISE DA REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS

Nos vários ensaios de pressurização foram realizados pelo menos seis repetições (três de pressurização e três de despressurização), permitindo assim minimizar eventuais erros relacionados com o operador e avaliar a repetibilidade dos ensaios. De acordo com a Figura 5.1, observa-se maior variabilidade entre os vários resultados dos ensaios em despressurização (S1 e S2). Este fenómeno tem menor destaque nos ensaios S3 (chaminé e frinchas seladas), neste sentido admite-se que a maior flutuação nos resultados dos ensaios S1 e S2 se deva às frinchas da caixilharia das janelas. O comportamento das frinchas das juntas móveis (em especial nas janelas de abrir) é diferenciado em ensaios de pressurização e despressurização, o que conduz, tendencialmente, a caudais de ar inferiores no primeiro tipo de ensaios. Neste sentido verifica-se também maior dificuldade na estabilização dos caudais de ar nos ensaios de despressurização. De salientar o comportamento distinto registado no último ensaio S1 (despressurização) eventualmente associado a erros do operador.

Na Figura 5.1 são apresentados valores de  $n_{50}$  (expressão (2.13)), no entanto poderiam ser indicados outros valores derivados nesta comparação, nomeadamente  $Q_{50}$ ,  $w_{50}$  e  $q_{50}$ .

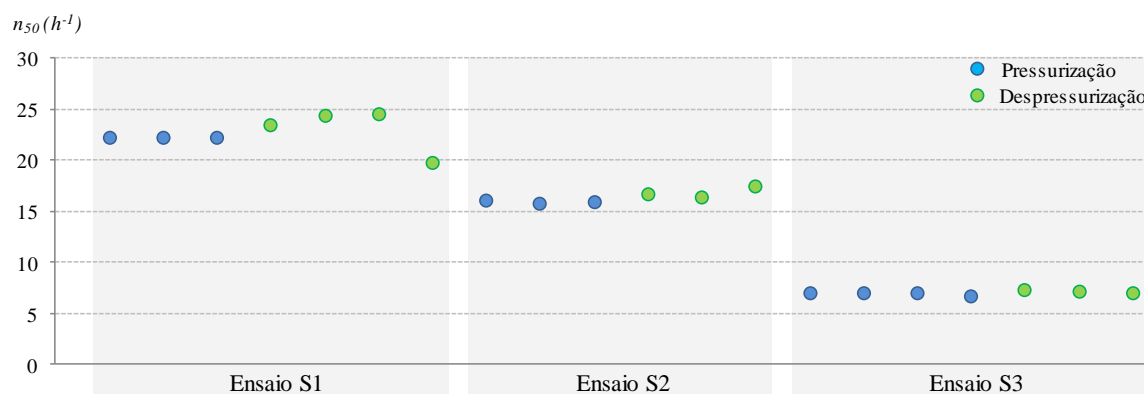


Figura 5.1 – Comparação dos valores de  $n_{50}$  obtidos nos ensaios de pressurização S1, S2 e S3.

### 5.1.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

Dos resultados verifica-se que a habitação na sua configuração actual ( $n_{50} = 16,3$ ) apresenta uma permeabilidade ao ar muito elevada, superior aos valores máximos compilados por [23]. O valor obtido confirma a elevada permeabilidade destes edifícios antigos, sendo representativo de diversos edifícios similares. Na Figura 5.2 apresentam-se algumas imagens do edifício adjacente n<sup>os</sup> 19 a 27 (Figura 3.2 c)), com época de construção semelhante à do edifício estudado, no entanto sujeito a algumas obras de reforço e modernização.



Figura 5.2 – Edifício adjacente, tipo Pombalino com obras de reabilitação e modernização. a) Janelas de peito (idêntico ao edifício estudado). b) Janela de sacada (vista pelo interior da habitação). c) Janela de sacada (vista pelo exterior). Medidas de melhoria da permeabilidade ao ar e à água: soleira em pedra trabalhada, perfil de alumínio e vedante.

Por comparação com o valor de  $n_{50} = 22,3 \text{ h}^{-1}$  (S1), a selagem da conduta da chaminé (S2) conduz à redução da permeabilidade ao ar da envolvente em 28% ( $n_{50} = 16,3 \text{ h}^{-1}$ ), evidenciando as características desta componente (conduta de grande secção) e a sua influência no sistema de ventilação. Melhorando a permeabilidade ao ar das janelas (S3) o valor de  $n_{50}$  é reduzido para  $7,0 \text{ h}^{-1}$ , uma redução em 69% relativamente à configuração actual. No entanto na determinação deste valor  $n_{50}$  a chaminé da cozinha encontrava-se vedada, não permitindo inferir unicamente o impacto da medida de melhoria à permeabilidade das janelas.

#### 5.1.4. CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS COMPONENTES DA ENVOLVENTE

As equações indicadas no Quadro 5.5 permitem caracterizar a permeabilidade ao ar das diversas componentes de ventilação e os mesmos serão adoptados no modelo numérico de simulação permitindo a validação do mesmo e estimar a taxa de renovação de ar horária ( $R_{ph}$ ) associada à implementação de melhorias. Neste sentido, no Quadro 5.6 são definidos dos caudais de ar das várias situações de ensaio para a série de valores de  $\Delta p$  utilizada nos ensaios, permitindo traçar as respectivas curvas de permeabilidade (Figura 5.3).

Quadro 5.6 – Determinação dos caudais de ar para vários valores de  $\Delta p$  (idêntico à gama de diferenciais de pressão utilizada nos ensaios realizados).

	$Q_{S1}$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	$Q_{S2}$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	$Q_{S3}$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	$Q_{S4}$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	$Q_{S5}$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )
$Q = C\Delta p^n$	$638,0\Delta p^{0,54}$	$488,2\Delta p^{0,52}$	$114,6\Delta p^{0,67}$	$111,8\Delta p^{0,65}$	$72,4\Delta p^{0,68}$
$\Delta p$ (Pa)	25	30	35	40	45
	3617	3990	4336	4659	4965
	2587	2843	3079	3300	3507
	994	1123	1245	1362	1474
	895	1007	1112	1212	1308
	642	727	807	883	957
	5532	5798	6071	6347	6623
	3891	4071	4251	4431	4611
	1686	1788	1890	1992	2094
	1489	1575	1661	1747	1833
	1096	1163	1230	1297	1364

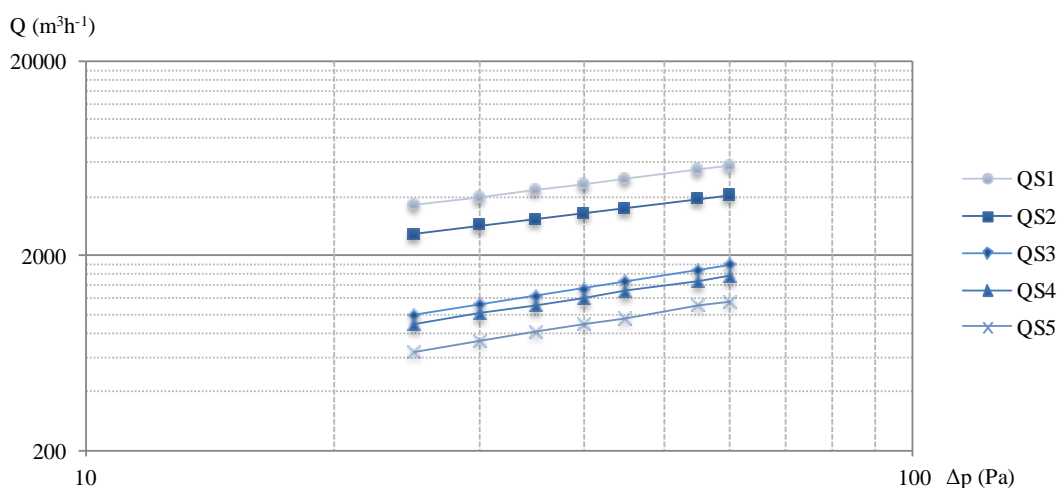


Figura 5.3 – Curvas de permeabilidade ao ar obtidas de acordo com os valores médios dos resultados dos ensaios de pressurização.

Em seguida apresentam-se as relações entre os resultados dos ensaios S1, S2, S3, S4 e S5, possibilitando deduzir os coeficientes e expoentes das curvas de pressurização ( $C$  e  $n$ ) dos vários componentes da envolvente do piso 2, nomeadamente a chaminé da cozinha, janelas, fachadas, pavimento e tecto. Os coeficientes de cada componente são determinados através da respectiva equação da recta característica da permeabilidade ao ar. Esta recta é função de  $\Delta p$  e estabelecida pela subtracção dos caudais de ar envolvidos nas diversas situações de ensaio (Quadro 5.6 e Figura 5.3) e são obtidos da seguinte forma:

$$\begin{aligned} Q_{chaminé} &= Q_{S1} - Q_{S2} & Q_{outros} &= Q_{S5} - Q_{S3} + Q_{S4} \\ Q_{janelas} &= Q_{S2} - Q_{S3} & Q_{pavimento} &= Q_{S3} - Q_{S5} \\ Q_{tecto} &= Q_{S3} - Q_{S4} & Q_{fachadas e janelas} &= Q_{S2} - 2Q_{S3} + Q_{S4} + Q_{S5} \end{aligned}$$

A permeabilidade definida por “outros” representa um diverso conjunto de infiltrações de difícil localização e caracterização, como frinchas entre a caixilharia exterior e cantarias dos vãos. Foi ainda determinada a associação da permeabilidade das fachadas e janelas, dada a sua necessidade no modelo numérico do sistema de ventilação exposto no Capítulo 6. De acordo com as expressões indicadas anteriormente, apresenta-se no Quadro 5.7 as equações de permeabilidade determinadas a partir dos valores de caudal de ar que cada componente admite através das suas frinchas, juntas ou aberturas, representado na Figura 5.4.

Quadro 5.7 – Equações de permeabilidade ao ar dos vários componentes da envolvente.

	$Q_{chaminé}$ ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )	$Q_{janelas}$ ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )	$Q_{tecto}$ ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )	$Q_{outros}$ ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )	$Q_{pavimento}$ ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )	$Q_{fachadas e janelas}$ ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )
25	1030	1593	99	543	351	2136
30	1147	1720	116	610	396	2330
35	1257	1834	133	674	438	2507
40	1360	1938	150	733	479	2671
45	1458	2033	166	791	517	2824
55	1641	2205	198	899	590	3104
60	1727	2283	213	950	625	3233
$Q = C \cdot \Delta p^n$	$153,6 \Delta p^{0,59}$	$414,6 \Delta p^{0,42}$	$5,6 \Delta p^{0,89}$	$69,7 \Delta p^{0,64}$	$42,2 \Delta p^{0,66}$	$461,9 \Delta p^{0,48}$

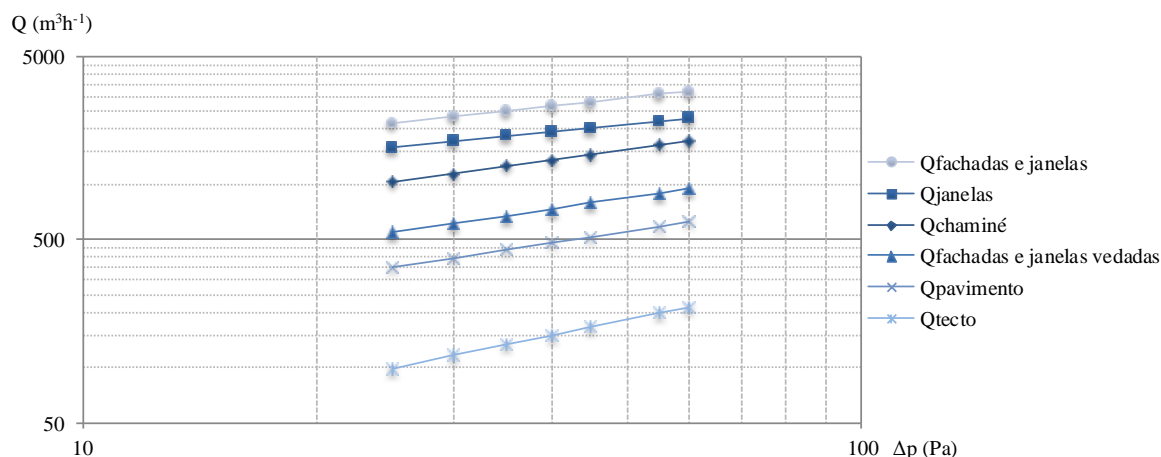


Figura 5.4 – Curvas de permeabilidade ao ar utilizadas na determinação das respectivas equações de permeabilidade dos vários componentes da envolvente.

### 5.1.5. ANÁLISE DA PERMEABILIDADE DOS COMPONENTES DA ENVOLVENTE

De acordo com a Figura 5.5, os resultados mostram que as janelas de madeira é a principal componente de infiltração de ar. De acordo com a norma EN 12207:1999 [18] e com o descrito no Quadro 2.2, é possível avaliar que as janelas são *Sem classe* dado que:  $Q_{50} = 161 \gg Q_{50 \text{ Classe 1}} = 31,4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2$ . Esta classificação é justificada pela degradação da madeira das janelas de peito e de sacada acentuando as juntas móveis. Apesar da melhoria da vedação da junta móvel das janelas com fita ( $Q_{50} = 64 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2$ ), estas continuam sem classificação. Nesta habitação, com pavimento de madeira, verifica-se que existe permeabilidade ao ar e trocas de ar entre pisos, em oposição ao que sucede nas habitações com lajes.

A grande secção da conduta da chaminé ( $1,00 \times 0,25 \text{ m}^2$ ) revela a influência deste elemento na permeabilidade e ventilação da habitação, aproximadamente 29%.

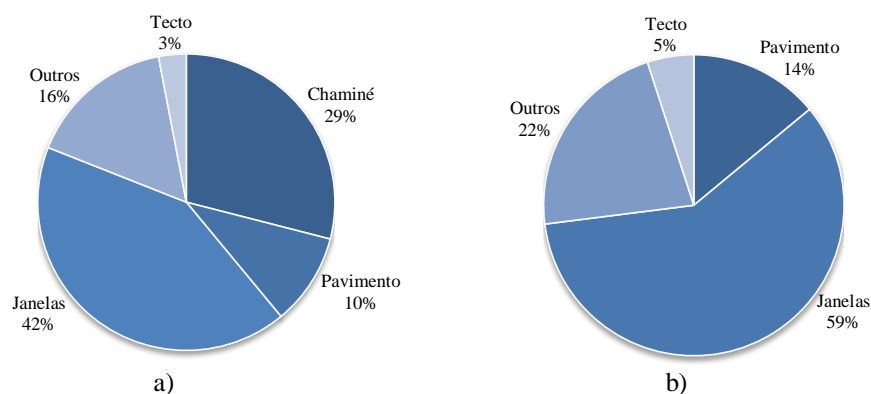


Figura 5.5 – Análise do impacto dos diferentes componentes da envolvente do edifício estudado. a) Influência de cada componente na ventilação global da habitação. b) Influência das componentes na ventilação com origem em infiltrações.

O pavimento e tecto do piso 2, apesar de não contribuírem na ventilação dado que são elementos de separação de espaços interiores e o ar que os atravessa não é “ar novo”, representam 19% das infiltrações da habitação. Observando as características *in situ* do tecto e pavimento de madeira,

é compreensível a maior permeabilidade deste último elemento justificada pelas frinchas entre as tábuas do soalho e a caixa-de-ar entre as vigas de madeira. A baixa permeabilidade ao ar do tecto é justificada pela menor susceptibilidade de degradação, pelo revestimento em estuque e, em alguns dos compartimentos, da sobreposição das pranchas de madeira.

De forma complementar ao objectivo deste trabalho foram também realizados ensaios de pressurização uma habitação de construção recente (anos de 1990) com estrutura de betão armado, caixilharias de alumínio e caixa de estore. No ANEXO F apresenta-se a exposição dos resultados obtidos nestes ensaios e que permitem avaliar as principais diferenças entre este tipo de construção e o “Gaioleiro”. No tipo construção do edifício descrito no ANEXO F, o pavimento e tecto em laje de betão armado não apresenta permeabilidade ao ar. Neste sentido, é menor a pluralidade de componentes de ventilação da envolvente com impacto na ventilação global deste género de habitações. Para o edifício ensaiado os caudais de ventilação (permeabilidade ao ar muito reduzida,  $R_{ph} = 0,27 \text{ h}^{-1}$ ) são divididos equitativamente por três componentes (chaminé, janelas e caixa-de-estores). Comparando o coeficiente perda de carga da chaminé do edifício “Gaioleiro” ( $C = 153,6$ ) e a chaminé do edifício de construção recente ( $C = 17,4$ ) é perceptível o impacto distinto no volume de caudal de ventilação entre estes dois tipos de construção.

## 5.2. MEDIÇÃO DA TAXA DE RENOVAÇÃO DO AR

Adoptando a metodologia indicada no Subcapítulo 4.3 foram obtidos os resultados que se apresentam em seguida. Os resultados obtidos nesta avaliação experimental permitirão validar o modelo de ventilação da habitação, descrito no Subcapítulo 6.3, e o impacte de algumas soluções de melhoria da permeabilidade na taxa de renovação de ar.

### 5.2.1. ENSAIO G1 – Situação actual do edifício

#### *a) Resultados do ensaio*

O ensaio G1 foi realizado no dia 6 de Maio de 2011 e corresponde à medição da taxa de renovação de ar para as condições actuais do edifício, ou seja, chaminé desobstruída e janelas fechadas (apenas as aberturas indevidas foram seladas).

Na Figura 5.6 são apresentados os resultados da medição da concentração de  $\text{CO}_2$ , sendo possível constatar que as concentrações medidas simultaneamente em dois compartimentos da habitação e situados em fachadas opostas (com dois aparelhos diferentes, Figura 4.3) são semelhantes, demonstrando que a concentração de  $\text{CO}_2$  no interior é aproximadamente uniforme (estando as portas interiores abertas).

Observando a Figura 5.6 é visível o momento de injeção de gás traçador pelo aumento quase instantâneo da concentração, atingindo o patamar limite de leitura dos analisadores. Em seguida, face à renovação de ar da habitação a concentração  $\text{CO}_2$  decresce, expressão (2.17), e por fim a convergência e estabilização com a concentração natural de  $\text{CO}_2$  no espaço de ensaio. Para determinar a taxa média de renovação de ar no período de ensaio foram apenas utilizados os registos das concentrações referentes ao período no qual houve um decaimento exponencial (assinalado pela linha a cheio na Figura 5.6).

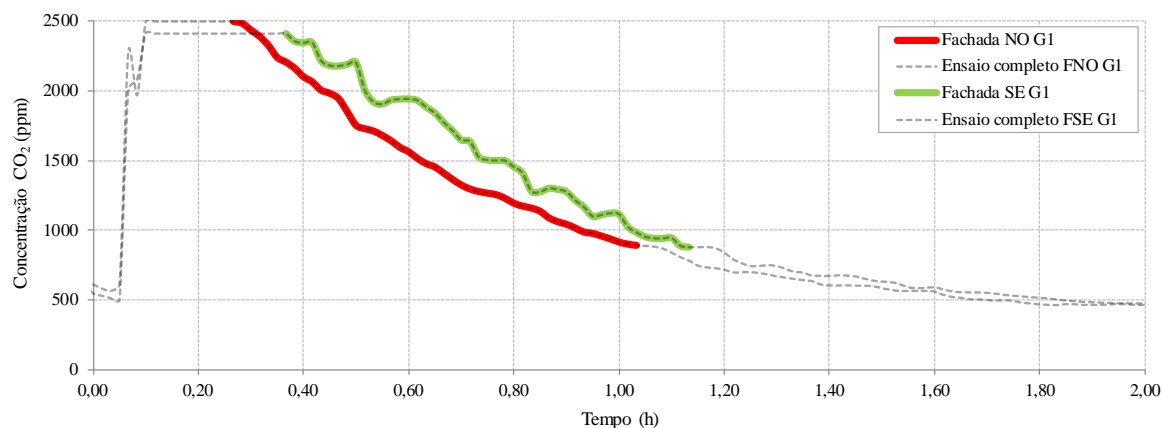


Figura 5.6 - Desenvolvimentos da concentração de gás traçador registado longo do ensaio G1 pelos analisadores  $A_1$  (compartimento junto à fachada NO) e  $A_2$  (compartimento junto à fachada SE).

#### b) Determinação da taxa de renovação de ar

Efectuando o ajuste dos resultados experimentais por uma expressão do tipo exponencial obtém-se directamente a taxa de renovação média de ar durante o período de ensaio.

Apresenta-se na Figura 5.7 a determinação dos expoentes (taxa de renovação), expressos através das linhas de tendência exponencial, para a situação de ensaio G1. A inclinação das linhas de tendência indica que a renovação horária é aproximadamente de  $1,36 \text{ h}^{-1}$  e  $1,39 \text{ h}^{-1}$ , nos compartimentos próximos às fachadas NO e SE.

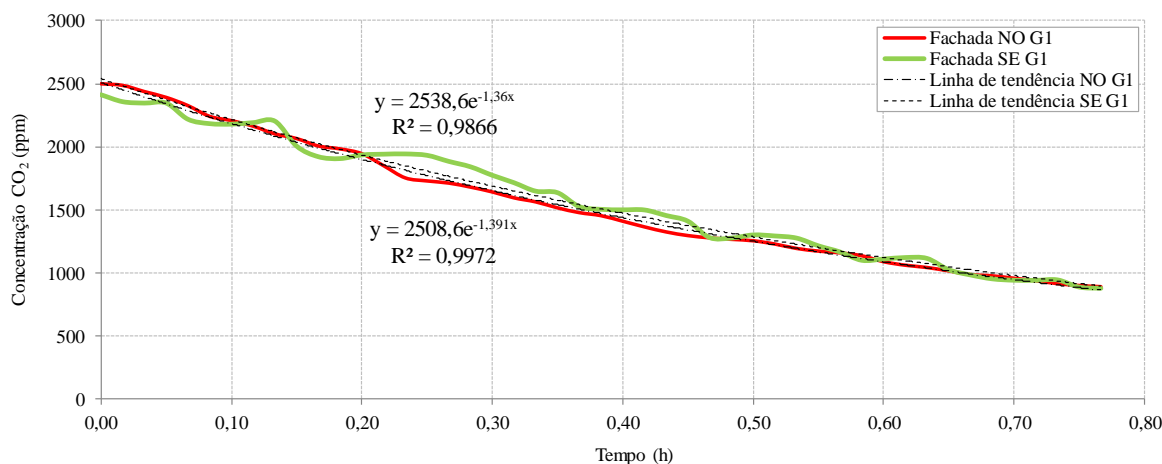


Figura 5.7 - Decaimento da concentração de  $\text{CO}_2$  registado no ensaio G1, decorrido no dia 6 de Maio de 2011 entre 16:30 e 18:30.

## 5.2.2. ENSAIO G2 – Conduta da chaminé selada

### a) Resultados do ensaio

O ensaio G2 foi realizado no dia 10 de Maio de 2011 e corresponde à medição da taxa de renovação de ar para as condições onde a conduta da chaminé do fogão é selada. As restantes aberturas encontram-se de acordo com o ensaio G1.

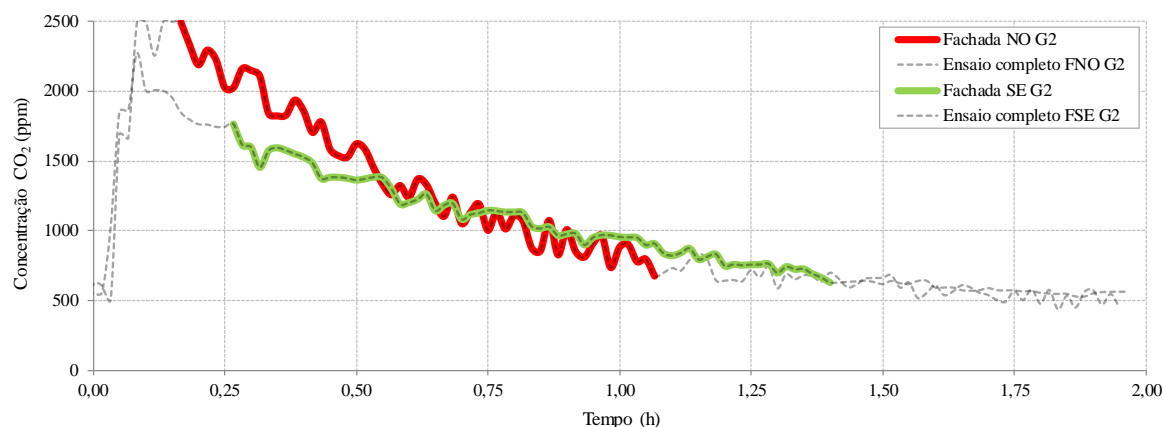


Figura 5.8 - Desenvolvimentos da concentração de gás traçador registado longo do ensaio G2 pelos analisadores A<sub>1</sub> (compartimento junto à fachada NO) e A<sub>2</sub> (compartimento junto à fachada SE).

### b) Determinação da taxa de renovação de ar

Efectuando o ajuste dos resultados experimentais por uma expressão do tipo exponencial obtém-se directamente a taxa de renovação média de ar durante o período de ensaio.

Apresenta-se na Figura 5.9 a determinação dos expoentes (taxa de renovação), expressos através das linhas de tendência exponencial, para a situação de ensaio G2. A inclinação das linhas de tendência indica que a renovação horária é aproximadamente de 1,31 h<sup>-1</sup> e 0,79 h<sup>-1</sup>, nos compartimentos próximos às fachadas NO e SE.

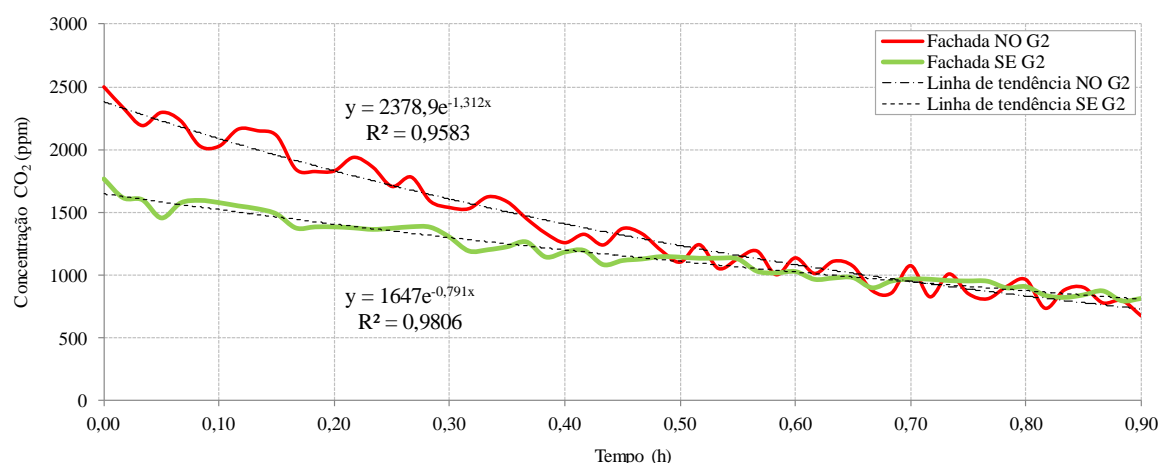


Figura 5.9 - Decaimento da concentração de CO<sub>2</sub> registado no ensaio G2, decorrido no dia 10 de Maio de 2011 entre 13:00 e 14:45.

### 5.2.3. ENSAIO G3 – Conduta da chaminé selada e frinchas vedadas

#### a) Resultados do ensaio

O ensaio G3 foi realizado no dia 10 de Maio de 2011 e corresponde à medição da taxa de renovação de ar para as condições estando a conduta da chaminé selada e as frinchas das janelas vedadas.

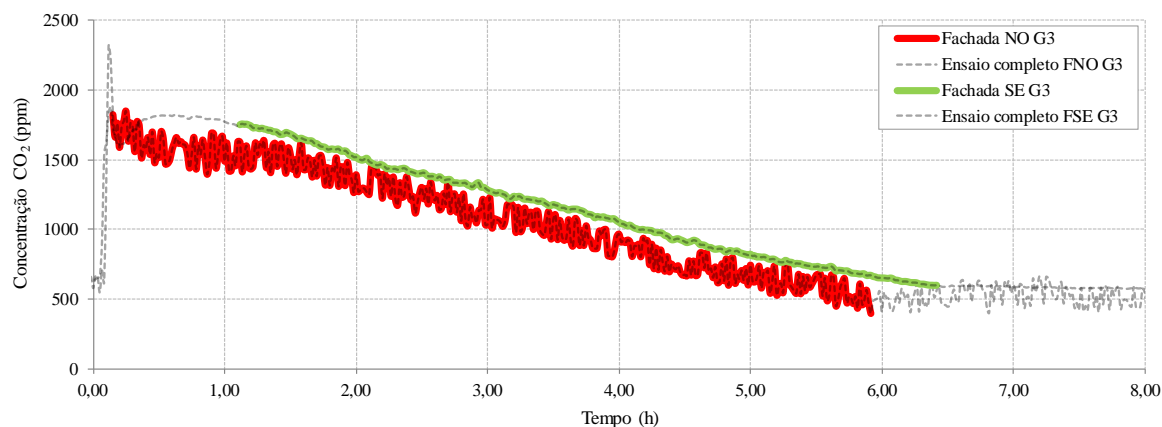


Figura 5.10 - Desenvolvimentos da concentração de gás traçador registado longo do ensaio G3 pelos analisadores A<sub>1</sub> (compartmento junto à fachada NO) e A<sub>2</sub> (compartmento junto à fachada SE).

#### b) Determinação da taxa de renovação de ar

Efectuando o ajuste dos resultados experimentais por uma expressão do tipo exponencial obtém-se directamente a taxa de renovação média de ar durante o período de ensaio.

Apresenta-se na Figura 5.9 a determinação dos expoentes (taxa de renovação), expressos através das linhas de tendência exponencial, para a situação de ensaio G2. A inclinação das linhas de tendência indica que a renovação horária é aproximadamente de  $0,21 \text{ h}^{-1}$ , nos compartimentos próximos às fachadas NO e SE.

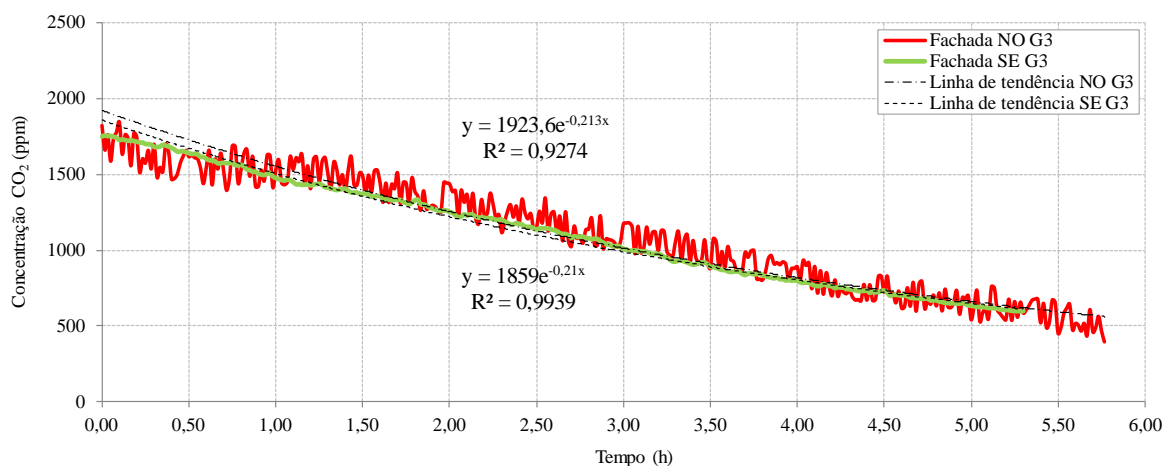


Figura 5.11 - Decaimento da concentração de CO<sub>2</sub> registado no ensaio G3, decorrido nos dias 10 e 11 de Maio de 2011 entre 15:45 e 11:30.

### 5.2.4. ESTIMATIVA DA INCERTEZA

A exactidão dos valores das taxas de renovação do ar apresentados encontra-se de acordo com a norma EN ISO 12569:2000 *Anexo C* [27], abaixo de 10% de incerteza. Os intervalos de confiança foram estimados da seguinte forma:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (Y_i - \hat{Y})^2}{k - 2} \quad (5.1)$$

$$E_n = \frac{s}{\sqrt{\sum_{i=1}^k (t_i - \bar{t})^2}} \quad (5.2)$$

sendo,  $k$  = número de amostras (-);  $Y$  = valor de  $\ln C_i$  (ppm);  $\hat{Y}$  = valor previsto de  $\ln C_i$  (ppm);  $t_i$  = tempo específico (h);  $\bar{t}$  = média dos intervalos de medida (h).

Os intervalos de confiança,  $F_n$ , de  $n$  para  $k$  amostras para a probabilidade de 95% ( $\alpha = 0,05$ ) são determinados através da distribuição *t-Student*, definida pela expressão (5.3):

$$F_n(t) = n \pm E_n \cdot t(k - 2; 1 - \alpha) \quad (5.3)$$

sendo,  $n$  = taxa de renovação de ar medido ( $\text{h}^{-1}$ );  $E_n$  = erro padrão de  $n$ ;  $t$  = valor determinado pela tabela de distribuição *t-Student* (-);  $(1-\alpha)$  = nível de confiança de  $n$  (-).

No ANEXO D, é descrito pormenorizadamente o cálculo dos intervalos de confiança indicados no Quadro 5.8.

Quadro 5.8 - Intervalos de confiança,  $F_n$ , das taxas de renovação do ar.

Ensaio	G1		G2		G3	
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>
<i>Analizador</i> <sup>(1)</sup>						
$N$	1,39	1,36	1,31	0,79	0,21	0,21
$k$	47	47	55	69	347	319
$E_n$	0,00573	0,01239	0,01959	0,00703	0,00162	0,00047
$t(k-2, 1-\alpha)$	1,67943	1,67943	1,67412	1,66792	1,64928	1,64967
$\pm$	0,00962	0,02080	0,03280	0,01173	0,00266	0,00077
$\pm$ (%)	0,69	1,53	2,50	1,48	1,25	0,37
$F_{n_{\max}}$	1,40	1,38	1,34	0,80	0,22	0,21
$F_{n_{\min}}$	1,38	1,34	1,28	0,78	0,21	0,21

<sup>(1)</sup> A localização dos analisadores está de acordo com a Figura 4.3.

No ensaio G2, o decaimento da concentração de CO<sub>2</sub> registado nos dois compartimentos (sala e quarto 3) próximos das fachadas NO e SE apresentam um comportamento desigual, resultando em taxas de renovação de ar distintos. O valor determinado pelo analisador A<sub>2</sub> no ensaio G2 é próximo dos obtidos no ensaio G1, não traduzindo efectivamente o efeito da selagem da conduta da chaminé. Neste sentido, dado o maior erro neste valor e na impossibilidade de repetir o ensaio, considerou-se na análise subsequente o valor de e 0,79  $\text{h}^{-1}$ .

### 5.2.5. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

No Quadro 5.9, indicam-se as condições ambientais e os valores da taxa de renovação de ar medidos nos três ensaios de gases traçadores. Estes valores correspondem a uma avaliação do desempenho da habitação e estabelecem as condições de validação do modelo de ventilação descrito no Subcapítulo 6.3.

Quadro 5.9 – Síntese das condições ambientais e resultados dos ensaios G1, G2 e G3.

Ensaio	Temperatura (°C)		Vento		$R_{ph}$ ( $h^{-1}$ )		
	Exterior	Interior	Vel. ( $m \cdot s^{-1}$ )	Direcção	Analizador A <sub>1</sub>	Analizador A <sub>2</sub>	Valor
G1	21,9	20,7	5,8	Sudoeste	1,36 ± 0,69%	1,39 ± 1,53%	1,38
G2	25,4	20,7	2,3	Este	1,31 ± 2,50%	0,79 ± 1,45%	0,79
G3	28,1	21,2	3,5	Noroeste	0,21 ± 1,25%	0,21 ± 0,37%	0,21

Da comparação dos resultados do ensaio G3 face ao G2, pode inferir-se o potencial de redução das infiltrações de ar através da reabilitação das janelas (no ensaio G3 as janelas são menos permeáveis que as janelas do ensaio G2). Contudo esse resultado também evidencia o risco de uma ventilação insuficiente após a eventual reabilitação de janelas, caso a menor permeabilidade ao ar da envolvente não seja compensada pela instalação de dispositivos de admissão de ar (por exemplo, grelhas auto-reguláveis). Este é um aspecto crítico e frequentemente negligenciado na reabilitação. A comparação dos resultados do ensaio G2 face ao G1 não é directa, pois existe uma variação relevante nas condições ambientais de ensaio, nomeadamente a intensidade do vento, no entanto é perceptível a influência da exaustão de ar pela chaminé.

A concentração de CO<sub>2</sub> foi medida em dois compartimentos da habitação e situados em fachadas opostas (Figura 4.3), não sendo observadas variações de concentração relevantes (com excepção do ensaio G2, como já referido no final da Secção anterior), pelo que nas condições de ensaio pode-se considerar a habitação como uma zona única, ou seja, as condições interiores (temperatura e pressão) são uniformes em todo o espaço de ensaio.

## 6. DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

### 6.1. ASPECTOS GERAIS

Em seguida é exposto o modelo nodal de ventilação, baseado na norma EN 15242:2007 [8] e desenvolvido para a habitação do piso 2.

O modelo numérico de ventilação tem em consideração as equações de permeabilidade determinadas a partir dos resultados obtidos nos ensaios de pressurização (Subsecção 5.1.4), integrando também os factores relativos aos mecanismos de ventilação natural (temperatura e vento) descritos no Subcapítulo 3.3.

Para validar o modelo numérico de simulação, procedeu-se à simulação das condições representativas dos três ensaios de gás traçador (G1, G2 e G3), Quadro 5.9, ponderando assim todos os parâmetros envolvidos na estimativa das taxas de ventilação. Para a validação do modelo, considera-se que este deve estimar valores próximos dos determinados experimentalmente (Subcapítulo 5.2), considerando-se aceitável um desvio máximo de 10% face às incertezas experimentais envolvidas. De salientar que para o modelo numérico não existe qualquer indicação normativa relativamente ao valor máximo das incertezas.

Com o modelo validado são estimadas as taxas médias de ventilação para a estação de aquecimento e são também estudadas as oportunidades de melhoria tendo como referência as exigências de qualidade do ar interior e de eficiência energética. A finalidade deste estudo é o contributo para a reabilitação sustentável destes edifícios do tipo “Gaioleiro” (e semelhantes), e evitar que à reabilitação estejam associadas patologias como a ocorrência de condensações, a degradação da qualidade do ar interior, a deficiência do sistema de ventilação ou o mau funcionamento de aparelhos de queima.

De forma complementar ao objectivo deste trabalho, foi também elaborado um modelo numérico do sistema de ventilação de uma habitação de construção recente (anos de 1990) com estrutura de betão armado, caixilharias de alumínio e caixa de estore. No ANEXO F apresenta-se uma exposição dos resultados obtidos com o modelo do sistema de ventilação natural da habitação. A metodologia utilizada é semelhante à descrita nos pontos seguintes.

### 6.2. MÉTODO DE CÁLCULO

Para efectuar a avaliação da ventilação dos edifícios ao longo de uma estação e efectuar a análise de oportunidades de melhoria foi implementado um modelo de ventilação do edifício, particularmente o sistema de ventilação da habitação do piso 2. Para esse efeito foi desenvolvido um modelo nodal de ventilação programado numa folha de *Excel*, baseado na norma EN 15242:2007 [8].

Os valores de  $C$  e de  $n$  relativos à permeabilidade ao ar das componentes da envolvente (expressão (2.12)), têm por base os valores determinados experimentalmente através de ensaios de pressurização referido no Subcapítulo 4.2.

Analisando as características do edifício e da sua implantação urbana, este é classificado como um edifício de perfil baixo e com as fachadas protegidas [8]. Face à geometria do edifício e à sua protecção foram adoptados os coeficientes de pressão considerados mais adequados e expostos no Quadro 3.3. Devido à existência de frinchas no pavimento e no tecto, o modelo numérico tem ainda em consideração o “ar novo” proveniente das trocas de ar entre pisos, no entanto este fenómeno é apenas considerado na validação do modelo. Como referido anteriormente a validação do modelo recorre à simulação das condições representativas dos ensaios de gás traçador, assim, tal como nestes ensaios experimentais, as trocas de ar entre pisos foram contabilizados. Nas restantes situações em que o modelo foi utilizado (Subcapítulo 7.4), estas reduzidas trocas de ar não foram consideradas uma vez que não são efectivamente compostas por “ar novo” e logo não consideradas para renovação de ar.

### 6.2.1. MODELO NODAL DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO

Neste trabalho toda a área da habitação foi considerada como zona única, ou seja, existe comunicação interna entre todas as divisões e as condições internas são homogéneas. Esta é uma situação que nem sempre é verdadeira, contudo nos ensaios experimentais realizados (sem ocupantes e com as portas interiores totalmente abertas) foi obtido um decaimento da concentração semelhante em diferentes compartimentos nos ensaios com gases traçadores. No modelo foram implementados os pisos 1 e 3, permitindo considerar os fluxos de ar existentes entre pisos devido à permeabilidade do pavimento e tecto (apenas na validação do modelo, descrito no ponto anterior). Na Figura 6.1 é representado graficamente o modelo nodal utilizado na simulação do sistema de ventilação da habitação do segundo piso do edifício “Gaioleiro”.

De acordo com o conceito de modelação nodal, o edifício é representado por uma rede formada por um conjunto de nós que representam as habitações (espaços) e as condições exteriores de pressão junto das aberturas, bem como pela ligação desses nós através das relações pressão-caudal de ar adequadas. A pressão nos nós exteriores é determinada através dos valores da velocidade do vento, coeficientes de pressão ( $C_p$ ), da temperatura exterior e interior e da cota de cada nó.

As pressões nos nós interiores são desconhecidas, sendo necessário resolver o sistema de equações não lineares correspondente à aplicação do princípio de conservação de massa de cada volume de controlo (espaço/habitação). A resistência ao escoamento de ar entre os vários nós é representada por elementos de ligação ou aberturas.

Neste modelo os dados de entrada (*inputs*) são:

- condições atmosféricas (temperatura exterior, velocidade e direcção do vento);
- temperatura interior em cada zona;

- cotas e os coeficientes relativos à permeabilidade dos componentes que integram a envolvente ( $C$  e  $n$ ) (frinchas das caixilharias, conduta da chaminé, frinchas do pavimento e teto);
- coeficientes de pressão referentes ao ponto médio das fachadas e na cobertura de acordo com a orientação do vento,  $e$ ;
- as dimensões de todas as zonas (volume).

Os dados de saída (*outputs*) são:

- pressão em cada nó interior;
- diferenças de pressão em cada abertura e pressões internas em cada zona;
- caudais em cada abertura (nos dois sentidos),  $e$ ;
- renovações de ar horárias em cada zona.

Na Figura 6.1, ilustra-se a configuração do sistema nodal de ventilação, nomeadamente os nós de pressão ( $A_{P_i}$ ,  $B_{P_i}$ ,  $C_{P_i}$  e  $D_{cobertura}$ ) e as resistências ao fluxo de ar ( $R_{i_{P_i}}$ ).

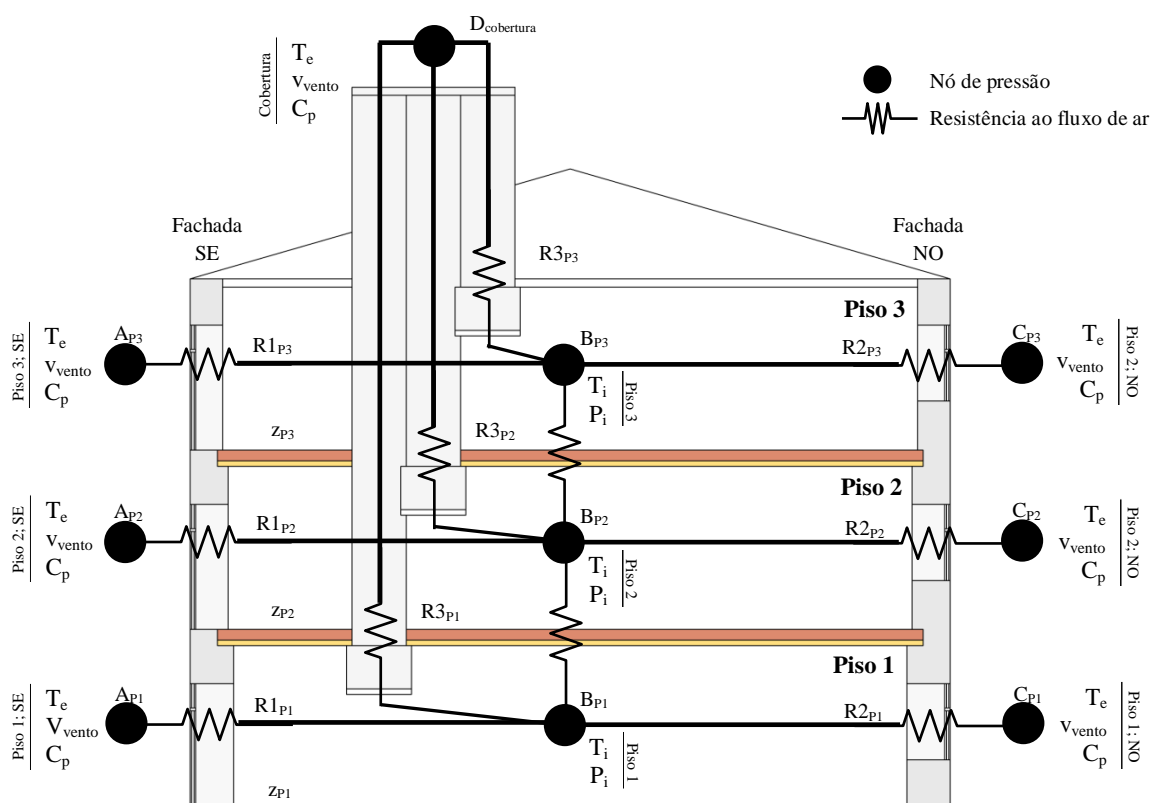


Figura 6.1 - Representação do modelo nodal do sistema de ventilação da habitação estudada (piso 2).

A taxa de renovação de ar é calculada resolvendo a equação de conservação de massa do volume de ar interior, cuja única incógnita é a pressão interior. Obtendo a pressão interior, são determinadas as diferenças de pressão em cada componente de escoamento de ar e os respectivos caudais de ar, expressão (2.12). A solução do sistema de equações não lineares é obtida através de um método iterativo implementado no *Excel*.

Um dos aspectos a considerar no modelo é a distribuição dos locais de infiltração de ar. Estes locais são em geral desconhecidos, no entanto de acordo com a norma EN 15242:2007 [8] o coe-

ficiente  $C$  (expressão (2.12)), que caracteriza a permeabilidade das janelas e fachadas deve ser distribuído pelas fachadas e pelo pé-direito da habitação ou compartimento. A divisão do valor de  $C$  pode ser equitativa ou ajustada segundo a apreciação das principais origens de infiltração. Como exemplo apresenta-se na Figura 6.2 a distribuição do coeficiente  $C$  utilizado no modelo numérico para a simulação dos ensaios de gases traçadores G1, G2 e G3. Na simulação dos ensaios G1 e G2, devido à óbvia origem de infiltrações (frinchas das caixilharias das janelas), o coeficiente  $C$  foi distribuído em função da dimensão das frinchas (maior dimensão junto à soleira das janelas de sacada e na fachada SE). Para o ensaio G3 a distribuição foi equitativa dado que a vedação das frinchas permite uniformizar permeabilidade da caixilharia das janelas.

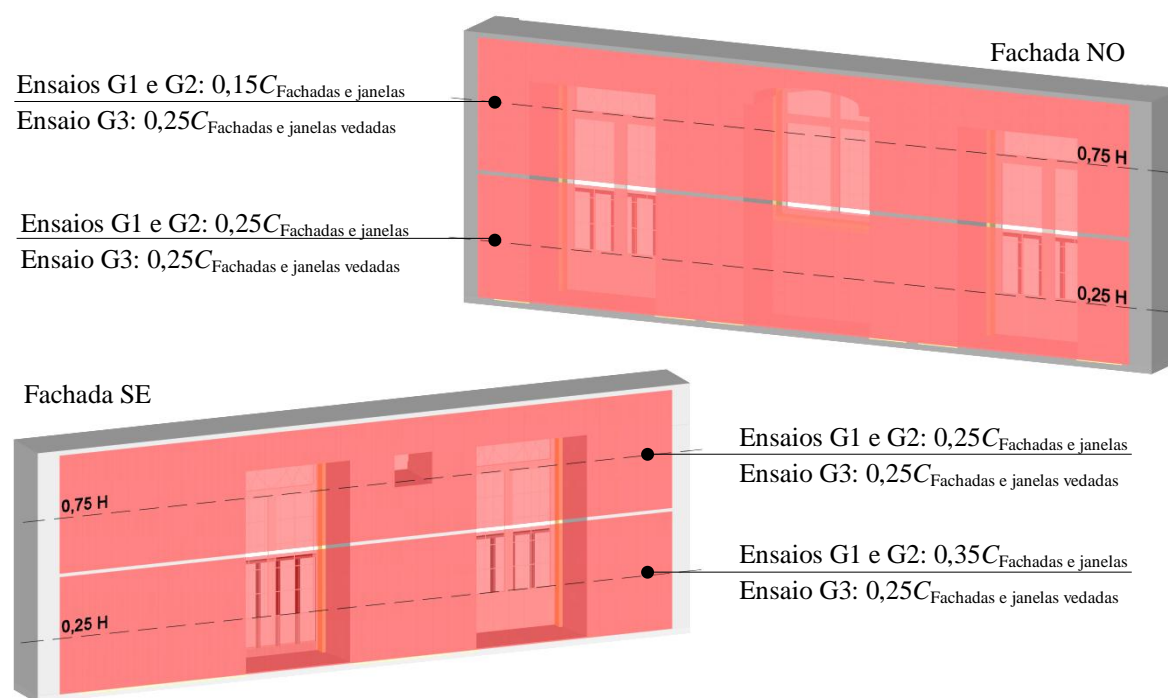


Figura 6.2 - Distribuição do coeficiente de permeabilidade,  $C$ , para simulação dos ensaios G1, G2 e G3.

### 6.3. VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO DE VENTILAÇÃO

#### 6.3.1. CASO G1 – Situação actual do edifício

As aberturas da envolvente para o ensaio G1 encontram-se nas condições normais e habituais de utilização, ou seja, janelas fechadas e conduta chaminé da cozinha desobstruída. Os valores de  $C$  e de  $n$ , expressão (2.12), têm por base os valores determinados experimentalmente através de ensaios de pressurização, exposto na Secção 5.1.4. As condições ambientais, nomeadamente a temperatura do ar exterior e interior, velocidade e direcção do vento são os registados durante o ensaio de gás traçador G1, Quadro 5.9. Os coeficientes de pressão devido à acção do vento definidos para cada fachada e piso estão de acordo com o apresentado no Quadro 3.3.

A síntese dos parâmetros utilizados para a validação do modelo estão representados na Figura 6.3.

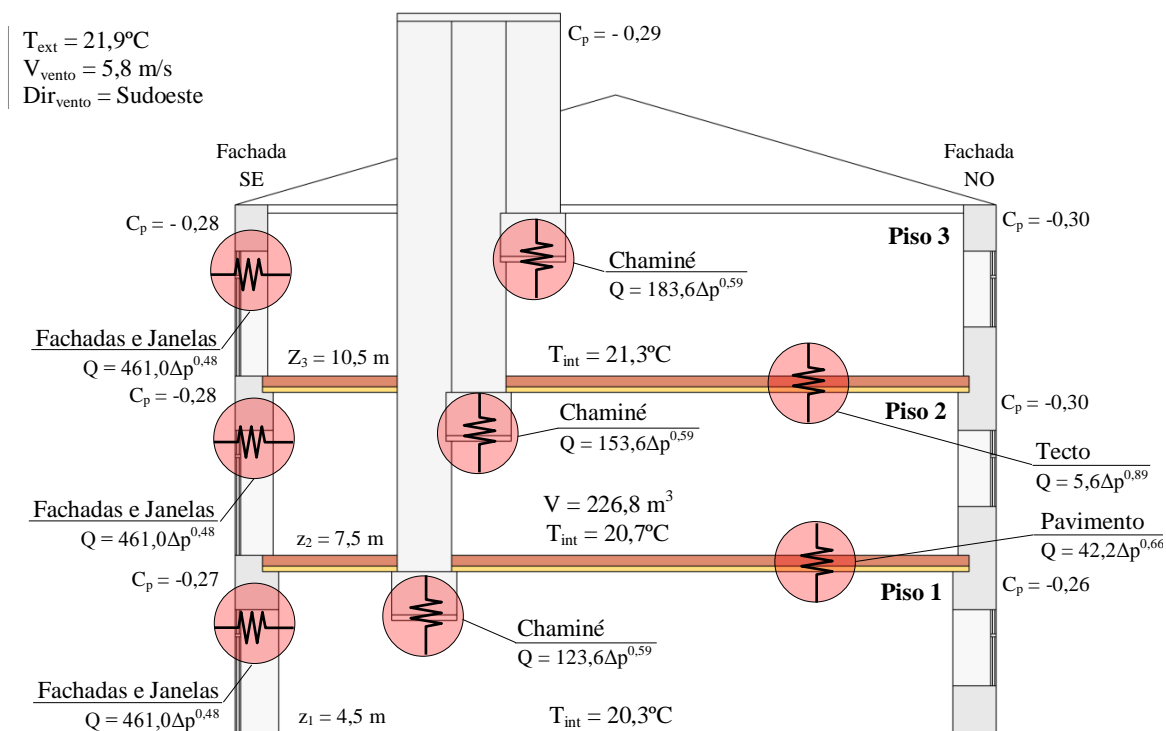


Figura 6.3 - Representação gráfica dos parâmetros utilizados no modelo numérico para a simulação do ensaio G1 de gases traçadores. As resistências ao fluxo de ar na fachada e janelas NO são respectivamente iguais às indicadas na fachada SE (sendo  $C$  distribuído de acordo com a Figura 6.2).

O valor da taxa de renovação de ar estimado através do modelo numérico foi de  $1,46 \text{ h}^{-1}$ , um desvio de 5,5% em relação ao valor determinado experimentalmente ( $1,38 \text{ h}^{-1}$ ).

### 6.3.2. CASO G2 – Conduta da chaminé selada

No ensaio G2, a conduta da chaminé da cozinha foi selada, estando as restantes aberturas nas mesmas condições que do ensaio G1. Os valores de  $C$  e de  $n$ , expressão (2.12), têm por base os valores determinados experimentalmente através de ensaios de pressurização, exposto na Secção 5.1.1. As condições ambientais, nomeadamente a temperatura do ar exterior e interior, velocidade e direcção do vento são os registados durante o ensaio de gás traçador G2, Quadro 5.9. Os coeficientes de pressão devido à acção do vento definidos para cada fachada e piso estão de acordo com o apresentado no Quadro 3.3.

A síntese dos parâmetros utilizados para a validação do modelo estão representados na Figura 6.4.

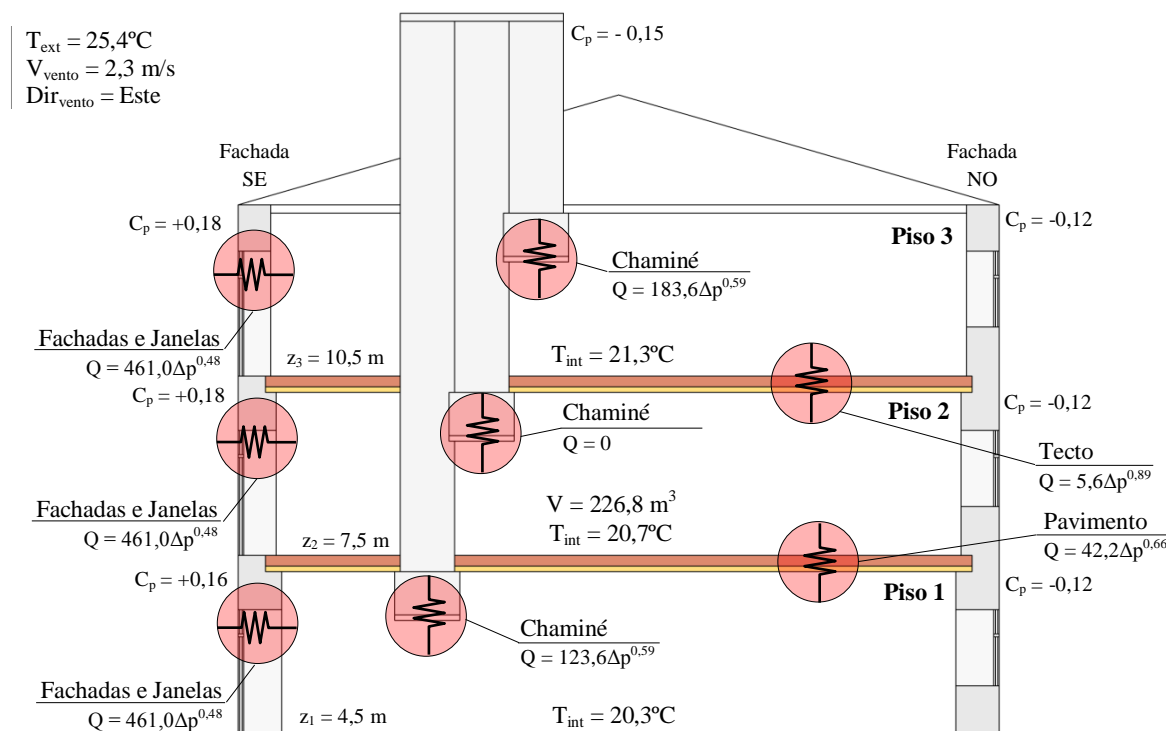


Figura 6.4 - Representação gráfica dos parâmetros utilizados no modelo numérico para a simulação do ensaio G2 de gases traçadores. As resistências ao fluxo de ar na fachada e janelas NO são respectivamente iguais às indicadas na fachada SE (sendo  $C$  distribuído de acordo com a Figura 6.2).

O valor da taxa de renovação de ar estimado através do modelo numérico foi de  $0,72 \text{ h}^{-1}$ , um desvio de 9% em relação ao valor médio determinado experimentalmente ( $0,79 \text{ h}^{-1}$ ).

### 6.3.3. CASO G3 – Conduta da chaminé e frinchas seladas

No ensaio G3, as frinchas e juntas das caixilharias exteriores foram vedadas, estando as restantes aberturas nas mesmas condições que do ensaio G2. Os valores de  $C$  e de  $n$ , expressão (2.12), têm por base os valores determinados experimentalmente através de ensaios de pressurização, exposto na Secção 5.1.1. As condições ambientais, nomeadamente a temperatura do ar exterior e interior, velocidade e direcção do vento são os registados durante o ensaio de gás traçador G3, Quadro 5.9. Os coeficientes de pressão devido à acção do vento definidos para cada fachada e piso estão de acordo com o apresentado no Quadro 3.3.

A síntese dos parâmetros utilizados para a validação do modelo estão representados na Figura 6.5.

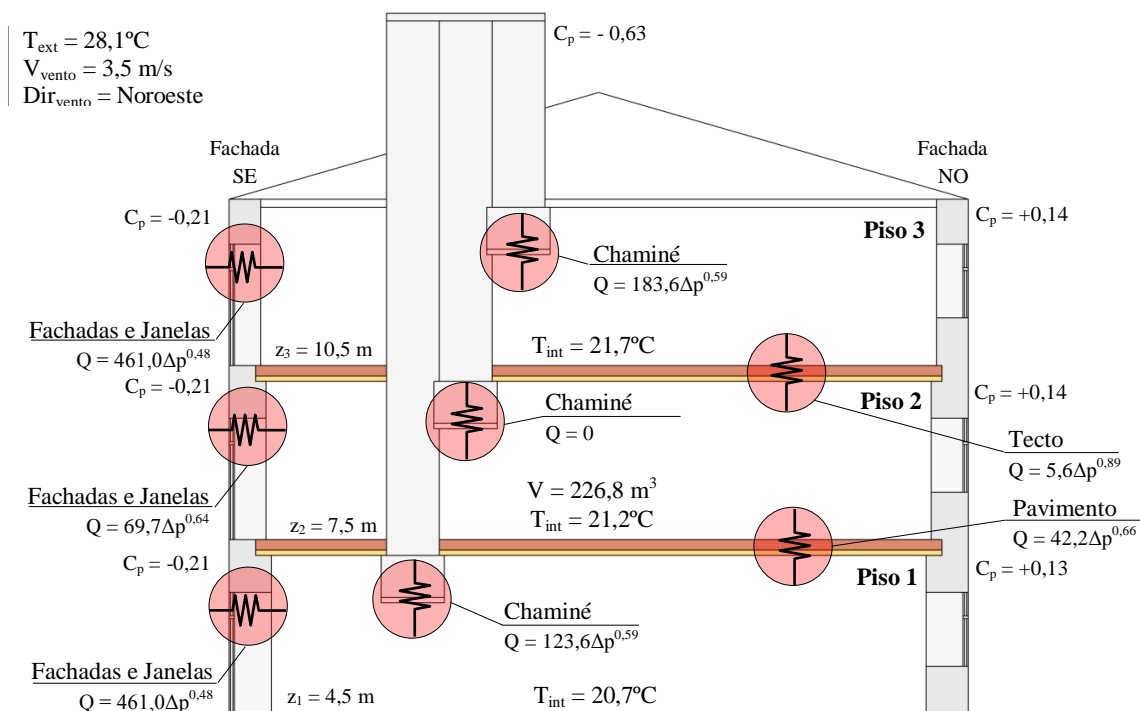


Figura 6.5 - Representação gráfica dos parâmetros utilizados no modelo numérico para a simulação do ensaio G3 de gases traçadores. As resistências ao fluxo de ar na fachada e janelas NO são respectivamente iguais às indicadas na fachada SE (sendo  $C$  distribuído de acordo com a Figura 6.2).

O valor da taxa de renovação de ar estimado através do modelo numérico foi de  $0,20 \text{ h}^{-1}$ , um desvio de 5,0% em relação ao valor determinado experimentalmente ( $0,21 \text{ h}^{-1}$ ).

### 6.3.4. SÍNTESE

No Quadro 6.1 apresentam-se em síntese dos resultados obtidos experimentalmente e dos estimados com o modelo numérico. Comparando os resultados da taxa de renovação de ar calculados e os medidos, tem-se uma diferença média de 6,5 %, o que se considera aceitável face às incertezas dos métodos experimentais e à adaptação dos valores de coeficiente de pressão. Estes resultados evidenciam a adequação dos dados utilizados com fim a estimar o efeito da permeabilidade ao ar da envolvente (comparação de G2 e G3), bem como a influência da chaminé (G1 face a G2).

Quadro 6.1 - Comparação entre os resultados obtidos nos ensaios de gás traçador e modelo numérico.

	Ensaio gases traçadores			Modelo numérico		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3
$R_{ph} \text{ (h}^{-1}\text{)}$	1,38	0,79	0,21	1,46	0,72	0,20
Desvio				5,5% (0,08)	-9,0% (-0,07)	-5,0% (-0,01)

O método de ventilação está adequadamente validado e adaptado à ventilação natural da chaminé e ventilação cruzada do edifício estudado.



## 7. ESTUDO DE OPORTUNIDADES DE MELHORIA

### 7.1. ASPECTOS GERAIS

A reabilitação térmica tem como finalidade a melhoria do conforto térmico dos ocupantes e ou a redução da factura energética, para um igual nível de conforto. Este facto é bem evidenciado pela regulamentação portuguesa, através de parâmetros nominais de consumo e a consequente vertente economicista para os potenciais consumidores. A ventilação, sendo uma das parcelas de maior relevância das perdas térmicas, deve ser evidenciada na maioria dos casos de dimensionamento e ou reabilitação. A melhoria da permeabilidade ao ar da envolvente, além de contribuir na melhoria do desempenho térmico dos edifícios, permite também melhorar o isolamento acústico da envolvente. Para que seja possível ter em consideração as opções de melhoria mais adequadas e devidamente enquadradas, é necessário conhecer tão bem quanto possível a situação actual e a determinação suas vantagens através da utilização de ferramentas validadas [46].

### 7.2. REQUISITOS DE QUALIDADE DO AR INTERIOR

As medidas de melhoria e o seu grau de intervenção, incidindo fundamentalmente nos locais de infiltração (principais intervenientes no sistema de ventilação natural de edifícios antigos), pode conduzir ao decréscimo acentuado da ventilação e não assegurar a taxa de renovação de ar necessária para a qualidade do ar interior (QAI) e conforto dos ocupantes. Nestes casos é evidente a importância da correcta análise e definição das propostas de melhoria, conciliando os vários aspectos envolvidos, tais como a viabilidade económica das propostas, conforto e qualidade do ambiente interior, eficiência energética e adequação das medidas de melhoria à habitação e edifício. Em seguida são definidas, para a habitação estudada, as taxas mínimas de renovação do ar indicadas pela regulamentação nacional (directa ou indirectamente relacionadas com a ventilação natural), com o objectivo de assegurar os requisitos mínimos de manutenção da QAI:

- RCCTE [6], neste regulamento é definido para edifícios em conformidade com as disposições da norma NP 1037-1:2002 [20] uma taxa de referência global de renovação do ar, a adoptar na avaliação da eficiência energética, de  $0,60 \text{ h}^{-1}$ . Igualmente nas restantes situações de inconformidade com a norma, a habitação deve ser ventilada com um caudal mínimo que de ar que garanta uma taxa de renovação mínima de  $0,60 \text{ h}^{-1}$ . Este valor deve ser garantido pelos sistemas de ventilação existentes sob as condições médias de funcionamento;
- NP 1037-1:2002 [20], não sendo uma norma específica da ventilação permite determinar as medidas necessárias a implementar para garantir uma taxa de renovação do ar associada à evacuação de combustão dos aparelhos a gás permitindo garantir a QAI. Nas propostas de melhoria apresentadas, é definido um aparelho a gás tipo C (aparelhos estanques com admissão e evacuação independente da ventilação do local de instalação), estes apa-

relhos não são considerados na determinação do caudal-tipo. No entanto, será também analisado o impacto dos restantes tipo de aparelhos (A e B) no sistema de ventilação. Assim, com a instalação dos aparelhos tipo A e B, a taxa de renovação do ar é definida a partir dos caudais tipo a admitir e extrair dos compartimentos (principais e de serviço, respectivamente) em função do seu volume e características. Para a configuração actual do edifício, é estimado uma taxa de renovação do ar de  $0,73 \text{ h}^{-1}$ , e;

- RSECE [47], este regulamento indica a taxa mínima de renovação do ar para edifícios com sistemas de climatização, sendo esta estimada em função de parâmetros como o tipo de utilização do edifício e número de ocupantes. Nele encontra-se definido o caudal mínimo de “ar novo”, para residências, de  $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  por ocupante em quartos e salas (*Anexo VI*, [47]). Na eventual adopção de sistemas de climatização na habitação é estimado uma taxa mínima de renovação do ar de  $0,53 \text{ h}^{-1}$  (configuração da habitação: três quartos e sala (T3); ocupação: 4 pessoas).

### **7.3. IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE OPORTUNIDADES DE MELHORIA**

Os ensaios experimentais, realizados neste trabalho, permitiram não só caracterizar o sistema de ventilação do edifício em estudo, mas também constatar o potencial das intervenções de melhoria na taxa de renovação de ar e, conseqüentemente, nas necessidades energéticas neste tipo de edifícios.

Nestes edifícios do tipo “Gaioleiro” (e noutros semelhantes) os principais locais de infiltração de ar são, como indicado na Figura 5.5, as janelas degradadas e as fachadas. Dos ensaios realizados evidenciou-se que a conduta da chaminé tem grande influência na ventilação natural da habitação. As intervenções de melhoria devem ter em consideração estes aspectos, bem como as expectativas dos consumidores actuais, que valorizam, por exemplo, a existência de exaustores em detrimento das chaminés de grandes dimensões.

Devido à normal degradação das caixilharias de madeira e ao facto de serem utilizados vidros simples, é recorrente, de entre as medidas de reabilitação empregues, a substituição integral dos vãos envidraçados. No entanto em algumas situações, a permeabilidade ao ar da envolvente pode ser melhorada recorrendo à utilização de elementos simples e disponíveis comercialmente, como a vedação ou calafetagem das juntas móveis das caixilharias (Figura 7.1), que proporcionam resultados positivos e de maior economia. Estas medidas de melhoria, descritas anteriormente, foram consideradas nos ensaios experimentais com gases traçadores.

A substituição da caixilharia existente por caixilharia nova, caracterizada pela baixa permeabilidade ao ar, em reabilitação reduz as infiltrações de ar, podendo em alguns casos promover baixas taxas de renovação de ar e originar a ocorrência de condensações e outros fenómenos associados à

ventilação insuficiente dos espaços interiores, como se conclui dos ensaios de gases traçadores G2 e G3.



Figura 7.1 – Fitas vedantes utilizadas na calafetagem de juntas móveis de caixilharias. a) Fitas vedantes com autocolante [48]. b) Calafetagem da junta móvel de uma porta.

Nos casos de substituição de janelas, é necessário incluir grelhas de admissão de ar na envolvente exterior para assegurar o correcto funcionamento do sistema de ventilação e assegurar os caudais de ventilação de base. Para controlar os caudais de ventilação recomenda-se que sejam adoptadas grelhas auto-reguláveis, descritas na Secção 2.3.5. Estas grelhas regulam os caudais de admissão de ar em função das diferenças de pressão entre o ambiente exterior e o espaço interior, limitando a admissão de ar para caudais superiores à sua pressão de funcionamento, Figura 2.25 c). Neste trabalho, face à protecção do edifício ao vento, preconizou-se a aplicação de grelhas auto-reguláveis a 2 Pa em detrimento das grelhas auto-reguláveis a partir de 10 Pa ou 20 Pa, por forma a reduzir o número de grelhas a aplicar [23].

Na reabilitação e modernização de habitações antigas são frequentes obras de conservação, adaptação ou de reforço. Em algumas situações estas intervenções podem alterar directa ou indirectamente o funcionamento do sistema de ventilação natural destas habitações, por exemplo através da remoção da embocadura da chaminé para a instalação de exaustores de cozinha. Um dos aspectos negativos da incorporação destes equipamentos é, quando desligado, o efeito de selagem ou obstrução da conduta da chaminé, já que nestes casos, reduz-se de forma drástica o usual contributo da chaminé no sistema de ventilação natural das habitações e, assim, ocasionar graves distúrbios que frequentemente se traduzem no incumprimento das exigências de ventilação [20], como evidenciado nos ensaios de gases traçadores G1 e G2.

Em consequência de algumas medidas de reabilitação aplicadas e ou de condicionalismos específicos do edifício, como a ausência de acções naturais de intensidade suficiente para gerar naturalmente caudais satisfatórios de renovação de ar, pode conduzir à implementação de sistemas mecânicos de ventilação, necessário, de forma alternativa ou associada, para a conformidade regulamentar da QAI. Estas medidas de reabilitação ocorrem, fundamentalmente, em reabilitações de grande intervenção e investimento. Actualmente existem sistemas de ventilação híbridos que poderão ser utilizados sempre que os edifícios estejam dotados de condutas adequadas à ventilação natural.

Entre as estratégias de ventilação mecânica, o sistema de ventilação centralizado é dos mais correntes, permitindo assegurar em contínuo taxas de ventilação pretendidas em condições nominais (ausência de actividade nos compartimentos de serviços) ou em condições de caudal máximo. Este sistema consiste na admissão de “ar novo” em todos os compartimentos principais (quartos e sala) através de grelhas auto-reguláveis, escoamento do ar para os compartimentos de serviço (cozinha e instalação sanitária) e, por fim, a extracção do ar dos compartimentos de serviço para o topo da cobertura através de condutas colectivas com ligação à caixa de ventilação.

Com base nas habituais intervenções de reabilitação, anteriormente descritas, foram estudados diversos cenários para avaliação da sua potencial aplicabilidade no edifício em estudo e, genericamente, nos edifícios de tipologia estrutural semelhante. Os cenários correspondem às seguintes condições:

- M0, situação actual do edifício (cenário base);
- M1, melhoria das janelas existentes (sem classe, EN 12207:1999 [18]) aplicando meios simples e económicos, como aplicação de vedantes (calafetagem) nas caixilharias exteriores das janelas, reduzindo a sua permeabilidade ao ar;
- M2, substituição das janelas existentes por janelas da classe 4 [18] de madeira e vidro duplo;
- M3, instalação de exaustor na chaminé (obstruindo a saída da chaminé quando desligado) e melhoria da permeabilidade ao ar das janelas existentes aplicando meios simples e económicos de calafetagem das juntas móveis;
- M4, instalação de exaustor na chaminé (obstruindo a saída da chaminé quando desligado) e substituição das janelas existentes por janelas classe 4 [18] de madeira e vidro duplo;
- M5, idêntico a M2, sendo instaladas grelhas auto-reguláveis a 2 Pa (com um caudal de ar nominal total para a fracção de  $0,62 \text{ h}^{-1}$ ) na caixilharia das janelas classe 4 [18];
- M6, idêntico a M4, sendo instaladas grelhas auto-reguláveis a 2 Pa (com um caudal de ar nominal total para a fracção de  $2,11 \text{ h}^{-1}$ ) na caixilharia das janelas classe 4 [18], e;
- M7, este cenário tem por base um projecto de reabilitação previsto para o edifício estudado [49]. A ventilação é assegurada mecanicamente através do sistema VMC repartido pela cozinha e instalação sanitária. Na cozinha, a rede de condutas é individual e associado a um ventilador colectivo no topo da cobertura, sendo este distinto do ventilador que serve a rede de condutas colectivas da instalação sanitária. Os ventiladores têm funcionamento permanente, variando o caudal de extracção por comando horário. O funcionamento dos ventiladores em extracção máxima de ar na cozinha ( $180 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) e instalação sanitária ( $90 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) está de acordo com os períodos usuais de utilização destes espaços (cozinha: 12h-14h/19-22h e instalação sanitária: 7h-11h/18h-22h). Nos restantes períodos o caudal de extracção é de  $50 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  em cada compartimento de serviço. A admissão de ar de compensação é assegurada através de grelhas auto-reguláveis a 2 Pa, instaladas na caixilharia das janelas classe 4 [18]. Existe ainda um sistema de acumulação de água quente sanitária, através de caldeira mural tipo C a gás natural. A extracção dos produtos de combustão efectuada através de meios intrínsecos ao equipamento, associados a redes de

condutas individuais de admissão e exaustão de ar par a cobertura. Assim, este equipamento não tem impacto ou contribuição na ventilação da habitação.

Quadro 7.1 – Síntese os cenários de reabilitação e medidas propostas.

Cenário de reabilitação	Medidas de reabilitação				
	Calafetagem da caixilharia	Substituição da caixilharia	Instalação de exaustor*	Grelhas auto-reguláveis	Extracção mecânica
M0					
M1	●				
M2		●			
M3	●		●		
M4		●	●		
M5		●		● (A)	
M6		●	●	● (B)	
M7		●	●	● (C)	● (D)

Caudal nominal das grelhas auto-reguláveis a 2 Pa, a instalar nas janelas ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ), de acordo com a Figura 7.2:

(A) GRE1, GRE2, GRE3, GRE4, GRE5 = 30.

(B) GRE1, GRE 3, GRE 4 = 30; GRE2 = 120; GRE5 = 45; GRE6 = 135.

(C) GRE1, GRE3 = 30; GRE2 = 120; GRE4 = 45; GRE5 = 45; GRE6 = 90.

Caudal de extracção permanente/máximo ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ), de acordo com a Figura 7.2 b):

(D) VIS = 50/90; VCZ: 50/180.

\* A instalação de exaustor na chaminé, não se considera uma medida directa de melhoria do sistema de ventilação, no entanto tem um impacto significativo (selagem da chaminé) e assim avaliada neste estudo.

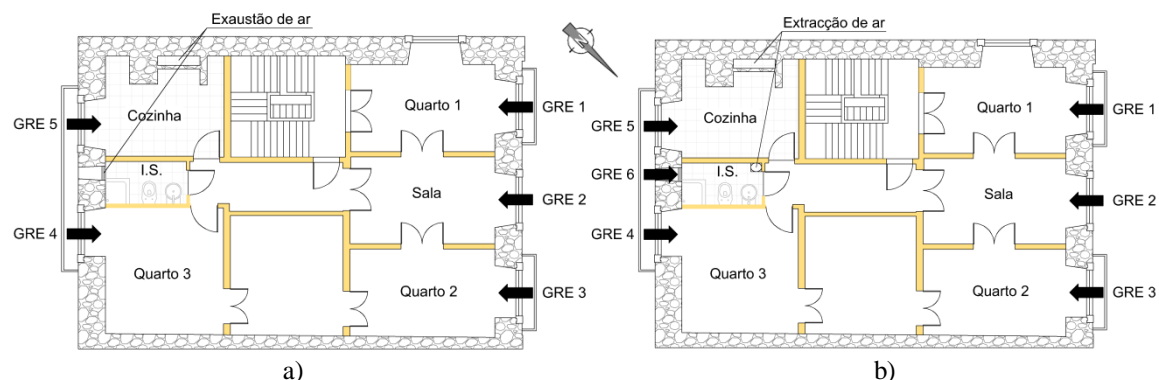


Figura 7.2 - Configuração das grelhas de admissão de ar auto-reguláveis a 2 Pa (GRE). a) Sistema de ventilação natural. b) Sistema de ventilação mecânica centralizada (VMC).

Nos cenários de reabilitação anteriormente indicados, é definido a existência de um aparelho a gás tipo C na cozinha para o aquecimento das águas quentes sanitárias, que, sendo um aparelho estante com admissão e evacuação independente da ventilação do local de instalação, não são considerados as exigências regulamentares dos caudais-tipo definidos na norma NP 1037-1:2002 na determinação da taxa de renovação. No entanto, será também analisado o dimensionamento e as alterações necessárias a implementar ao sistema de ventilação natural existente com base no cenário M5, por forma a acolher aparelhos a gás tipo A e B, segundo NP 1037-1:2002.

A influência e importância da melhoria da permeabilidade ao ar da envolvente no comportamento térmico de um edifício dependem das restantes características de desempenho térmico dos vários componentes da envolvente. Deste modo, para avaliar o impacto da melhoria do sistema de ventilação no desempenho térmico da habitação foi utilizada a metodologia de cálculo do RCCTE,

com excepção do valor da taxa de renovação de ar que foi estimado com base na simulação horária dos dados médios horários do ano climático de referência de Lisboa, entre 1 de Novembro e 10 de Abril, (estação de aquecimento).

O valor referente às perdas térmicas e ganhos solares para a situação actual da habitação em estudo encontram-se detalhados em [50]. No interesse do presente trabalho, o valor das necessidades nominais de energia útil de aquecimento ( $N_{ic}$ ) é expresso em função da taxa de renovação de ar horária ( $R_{ph}$ ). Existe ainda, no cálculo de  $N_{ic}$ , a variação nos valores referentes ao coeficiente de transmissão térmica ( $U_w$ ) e factor solar ( $g_{\perp_{vidro}}$ ) dos vãos envidraçados devido à substituição das janelas existentes ( $U_w = 4,16 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}$ ;  $g_{\perp_{vidro}} = 0,70$ ) por janelas classe 4 de madeira com vidro duplo ( $U_w = 1,60 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}$ ;  $g_{\perp_{vidro}} = 0,30$ ), expressões (7.1) e (7.2), respectivamente.

$$N_{ic} = \frac{3156 + 0,024 \cdot (0,34 \cdot GD \cdot R_{ph} \cdot V_{hab})}{A_{pav}} \quad (7.1)$$

$$N_{ic} = \frac{2232 + 0,024 \cdot (0,34 \cdot GD \cdot R_{ph} \cdot V_{hab})}{A_{pav}} \quad (7.2)$$

sendo,  $N_{ic}$  = necessidades nominais de energia útil de aquecimento ( $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ano}^{-1}$ );  $GD$  = graus dia ( $GD = 1190\text{°C}\cdot\text{dia}$ );  $R_{ph}$  = renovações horárias do ar da habitação ( $\text{h}^{-1}$ );  $V_{hab}$  = volume da habitação ( $V_{hab} = 226,8 \text{ m}^3$ );  $A_{pav}$  = área de pavimento útil da habitação ( $A_{pav} = 75,5 \text{ m}^2$ ).

Segundo a metodologia de cálculo do RCCTE, em função dos graus-dias e factor de forma deste edifício, é estimado o valor limite das necessidades nominais de energia útil para aquecimento ( $N_i$ ) de  $51,5 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ano}^{-1}$ . Dependente do seu grau de intervenção, os cenários de melhoria propostos devem resultar em valores de  $N_{ic}$  inferiores a  $N_i$  permitindo alcançar a eficiência energética e condições de conforto exigidas.

#### 7.4. RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DAS OPORTUNIDADES DE MELHORIA – $R_{ph}$ e $N_{ic}$ .

De acordo com os requisitos de ventilação dos regulamentos citados no Subcapítulo 7.2 e enquadrados ao edifício estudado, conclui-se a variedade e ambiguidade das exigências de ventilação aplicáveis. Para a avaliação do impacto das medidas de melhoria no sistema de ventilação define-se como valor mínimo da taxa de renovação de ar horária o preconizado pelo RCCTE, de  $0,60 \text{ h}^{-1}$ . Nas situações onde sejam implementadas medidas com recurso a sistemas de climatização ou instalação de aparelhos a gás tipo A ou B, os respectivos regulamentos admitem como mínimo de  $R_{ph}$  os valores  $0,53 \text{ h}^{-1}$  e  $0,73 \text{ h}^{-1}$ , respectivamente. No entanto, no dimensionamento de algumas das medidas de melhoria (com instalação de grelhas de ventilação) objectiva-se como  $R_{ph}$  mínimo o valor de  $0,60 \text{ h}^{-1}$ .

Como já referido anteriormente, o modelo numérico implementado permite determinar a taxa de renovação de ar e efeitos no sistema de ventilação resultante das medidas de reabilitação propostas para o edifício em estudo e, paralelamente avaliar o desempenho térmico da habitação através da metodologia de cálculo do RCCTE, permitindo a definição e fundamentação das melhores medidas de reabilitação a implementar em reabilitação deste tipo de edifícios.

No Quadro 7.2 são indicados, para a situação actual e cenários de reabilitação, os valores estimados das taxas médias de renovação de ar horária ( $R_{ph}$ ) na estação de aquecimento e respectivos valores das necessidades nominais de energia útil de aquecimento ( $N_{ic}$ ).

Quadro 7.2 - Taxa de renovação do ar e  $N_{ic}$  estimados para a situação actual e cenários de reabilitação.

Cenários	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
$R_{ph}$ ( $h^{-1}$ )	1,85	0,80	<0,10 <sup>(1)</sup>	0,17 <sup>(1)</sup>	<0,10 <sup>(1)</sup>	0,64	0,60	0,86
$N_{ic}$ ( $kWh \cdot m^{-2} \cdot ano^{-1}$ )	93,9 <sup>(2)</sup>	63,4 <sup>(2)</sup>	31,2	45,2	30,7	48,8	47,7	55,2 <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Taxa de renovação de ar insuficiente ( $< 0,6 h^{-1}$ ).

<sup>(2)</sup> Necessidades energéticas para aquecimento acima do limite ( $N_{ic} > N_i = 51,5 kWh \cdot m^{-2} \cdot ano^{-1}$ ).

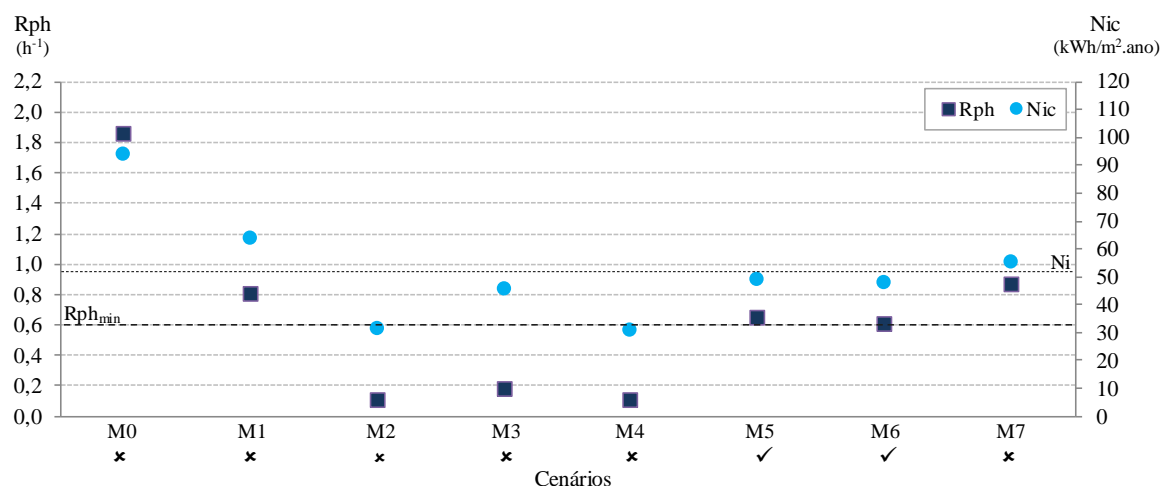


Figura 7.3 - Comparação dos valores de  $R_{ph}$  e  $N_{ic}$  dos cenários de reabilitação propostos.

#### 7.4.1. CENÁRIO M0 - Situação actual do edifício “Gaioleiro”

A taxa de renovação de ar estimada para a situação actual da habitação (M0) de  $1,85 h^{-1}$  traduz e confirma a elevada permeabilidade ao ar da envolvente, enquadrando-se acima dos limites definidos em alguns regulamentos europeus [25] e de eficiência energética.

#### 7.4.2. CENÁRIO M1 - Melhoria da permeabilidade das janelas com custo reduzido

O cenário de reabilitação M1 apresenta uma taxa de renovação razoável, de acordo com diversos regulamentos e textos da bibliografia dedicada a esta temática, evidenciando o importante efeito de alguns destes meios simples na melhoria da permeabilidade ao ar da envolvente. Apesar de  $N_{ic}$  ultrapassar o limite de referência  $N_i$ , não satisfazendo a necessária eficiência energética, estas medidas económicas e ligeiras não são abrangidas pelos requisitos impostos pelo RCCTE, devido

ao baixo investimento e intervenção, constituindo assim uma opção válida em situações de menor capacidade económica.

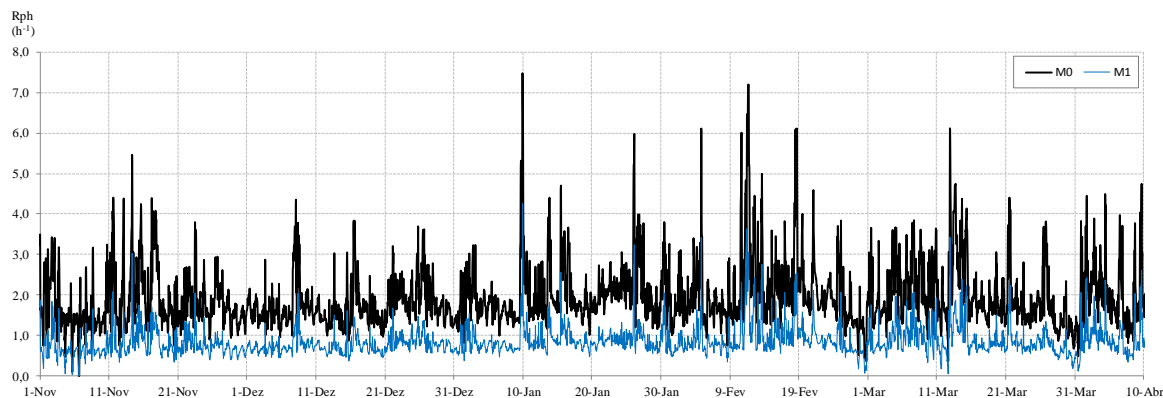


Figura 7.4 - Comparação da taxa de renovação do ar média, ao longo da estação de aquecimento, entre o cenário actual (M0) e a melhoria do sistema de ventilação através do cenário de reabilitação M1.

#### 7.4.3. CENÁRIOS M2, M3 E M4 - Melhoria da permeabilidade das janelas com custo reduzido e ou instalação de janelas classe 4 e ou exaustor na chaminé

Nos cenários de reabilitação M2, M3 e M4 apesar da melhoria significativa da eficiência energética, verifica-se que os valores estimados de  $R_{ph}$  são inferiores a  $0,60 \text{ h}^{-1}$ , evidenciando o risco de comprometer a QAI quando a permeabilidade ao ar da envolvente é reduzida e não compensada por aberturas de admissão de ar adequadas.

#### 7.4.4. CENÁRIO M5 - Instalação de janelas classe 4 e grelhas de ventilação

O cenário M5 (e M6), surge na sequência dos cenários M2 (e M4), no qual se considera a instalação de grelhas auto-reguláveis a 2 Pa na caixilharia exterior das janelas. Observando a Figura 7.3 e comparando os valores obtidos entre as duas situações (sem e com grelhas), confirma-se a importância da aplicação destas medidas complementares na reabilitação da permeabilidade ao ar da envolvente, assegurando os caudais de ventilação indispensável para a QAI.

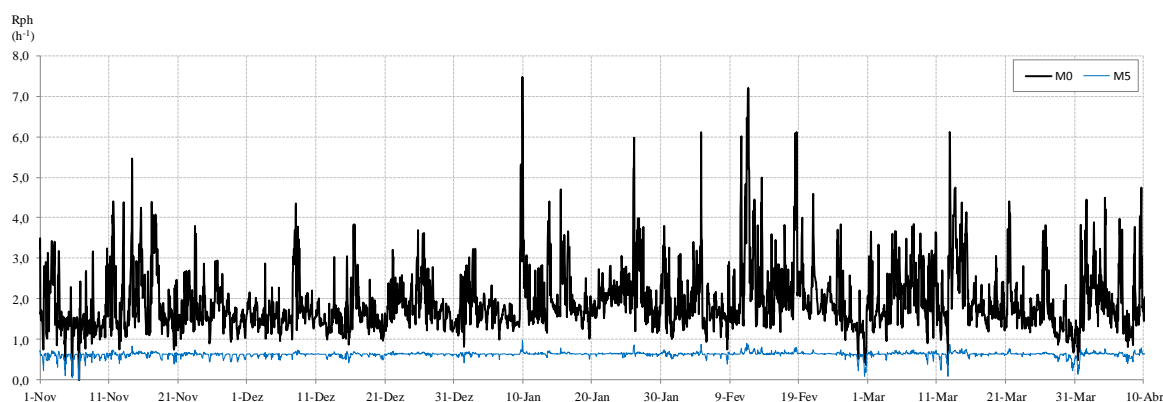


Figura 7.5 - Comparação da taxa de renovação do ar média, ao longo da estação de aquecimento, entre o cenário actual (M0) e a melhoria do sistema de ventilação através do cenário de reabilitação M5.

Da análise da Figura 7.5 observa-se que a taxa de renovação de ar não apresenta variações significativas, permitindo assegurar um valor de “ar novo” na habitação aproximadamente constante. Com o auxílio da chaminé na ventilação da habitação, mesmo em períodos de vento fraco (devido ao gradiente térmico e grande secção da conduta), permite exaurir o ar viciado e, consequentemente, provocar a admissão quase contínua de “ar novo” através das grelhas auto-reguláveis.

#### 7.4.5. CENÁRIO M6 - Instalação de janelas classe 4, grelhas de ventilação e exaustor na chaminé

O cenário de reabilitação M6 associa as medidas habituais de reabilitação e de modernização, sendo a ventilação assegurada unicamente pelas grelhas auto-reguláveis. A instalação do exaustor, com funcionamento pontual, inviabiliza a contribuição da chaminé na ventilação, conduzindo à necessária compensação através do aumento do número de grelhas na caixilharia. Os resultados obtidos demonstram que o dimensionamento das grelhas garante uma taxa de renovação do ar e eficiência energética satisfatória, no entanto é necessário recorrer ao aumento significativo do número de grelhas, comparando com M5, para assegurar a correcta ventilação nos períodos de menor incidência de vento nas fachadas. Efectivamente, no cenário M6 o caudal nominal das grelhas corresponde a  $2,11 \text{ h}^{-1}$  da habitação, em vez dos  $0,62 \text{ h}^{-1}$  do cenário M5.

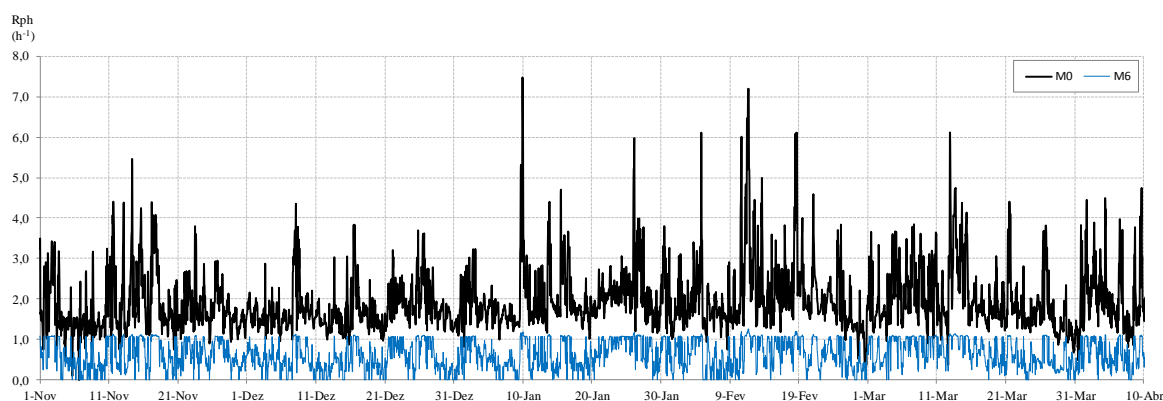


Figura 7.6 - Comparação da taxa de renovação do ar média, ao longo da estação de aquecimento, entre o cenário actual (M0) e a melhoria do sistema de ventilação através do cenário de reabilitação M6.

Comparando a Figura 7.5 e a Figura 7.6, pode-se concluir que a menor variação de  $R_{ph}$  do cenário de melhoria M5 deve-se à influência e capacidade de exaustão da chaminé. Em M6 a ventilação é unicamente dependente da capacidade de admissão e exaustão através das grelhas auto-reguláveis, decrescendo a taxa de renovação do nos períodos de menor intensidade e incidência do vento nas fachadas.

A elevada protecção das fachadas ao vento, característica destes edifícios dada a sua localização no centro urbano, conduz, em períodos de vento de menor intensidade, à redução da taxa de renovação do ar necessária para a QAI. Por estas situações conclui-se, da análise dos dois últimos cenários, M5 e M6, a importância em manter a abertura da chaminé desobstruída, permitindo na

ausência de vento proporcionar, de forma significativa, a ventilação da habitação através do efeito de chaminé, reduzir significativamente o número de grelhas a instalar e, ainda, a renovação de ar praticamente constante de  $0,6 \text{ h}^{-1}$ .

A maior exigência de conforto e modernidade conduz, frequentemente, à “obrigatória” instalação de exaustor ou até, em reabilitações de maior intervenção, à remoção da chaminé, implicando o aumento significativo de grelhas. Devido à área que as grelhas ocupam na caixilharia e dificuldade em gerar caudais de ventilação, esta opção de reabilitação (M6) pode ser inviabilizada. Em alternativa, pode ser necessário implementar um sistema de ventilação mecânico, garantindo caudais de ventilação permanentes com recurso a menor número de grelhas de admissão de ar.

#### 7.4.6. CENÁRIO M7 - Sistema de ventilação mecânico VMC

A taxa de renovação estimada para cenário M7, que simula o sistema de ventilação mecânico definido no projecto de reabilitação previsto para este edifício, é relativamente elevada ( $0,86 \text{ h}^{-1}$ ). Aplicando unicamente as medidas de melhoria da permeabilidade ao ar da envolvente (substituição das janelas) e sem implementar as restantes medidas previstas no projecto, como aplicação de isolamento térmico pelo interior, esta taxa de renovação não permite a eficiência energética pretendida ( $N_{ic} > N_i$ ). Assim, definiu-se uma correcção do sistema de ventilação previsto diminuindo o caudal de extracção máximo de 180 para  $150 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , obtendo uma taxa de renovação de  $0,60 \text{ h}^{-1}$  ( $N_{ic} = 47,7 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$ ). A seguinte análise tem por base esta correcção do caudal de extracção. Como já referido, este cenário integra um sistema de ventilação mecânico com funcionamento por comando horário, aumentando o caudal de extracção nos períodos de maior ocupação e utilização assegurando um  $R_{ph}$  entre  $0,44 \text{ h}^{-1}$  e  $1,06 \text{ h}^{-1}$ , independentemente das condições exteriores, Figura 7.7.

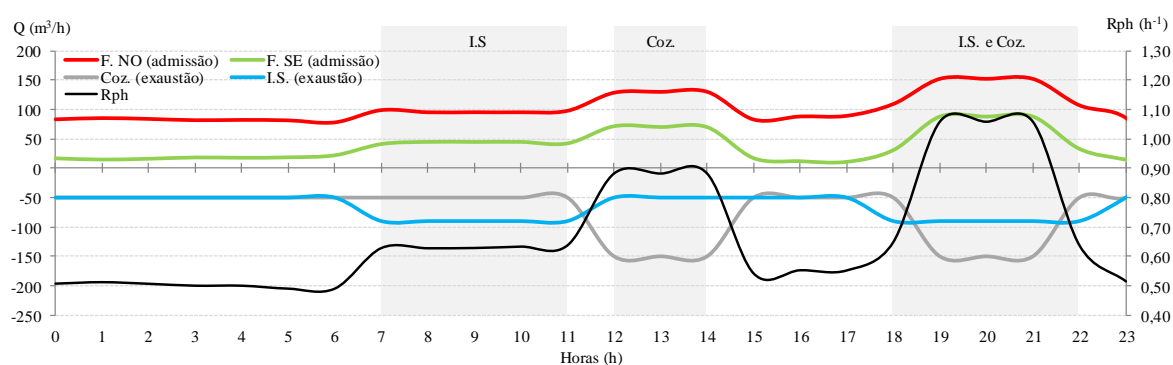


Figura 7.7 - Funcionamento do sistema de ventilação mecânico centralizado ao longo do dia para o cenário de reabilitação M7. Admissão de ar através de grelhas de ventilação nas fachadas (NO e SE) e exaustão através das condutas localizadas na cozinha e instalação sanitária.

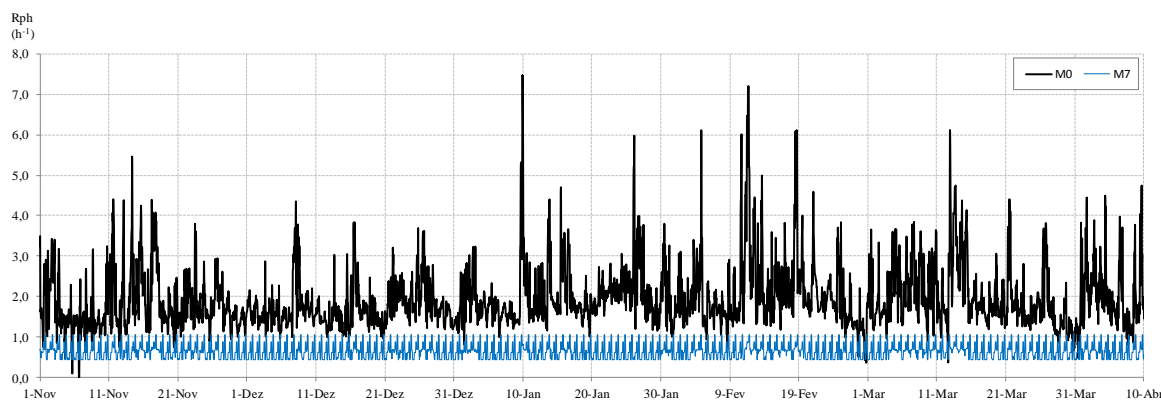


Figura 7.8 - Comparação da taxa de renovação do ar média, ao longo da estação de aquecimento, entre o cenário actual (M0) e o sistema de ventilação mecânico, cenário de reabilitação M7.

#### 7.4.7. CENÁRIO M5 - De acordo com a NP 1037-1:2002 (para aparelhos a gás tipo A e B)

Os cenários anteriores foram dimensionados considerando a utilização de um aparelho a gás tipo C, na cozinha, para o aquecimento de água quente sanitária. A seguinte análise tem em conta os caudais-tipos definidos pela norma NP 1037-1:2002 [20], permitindo a instalação dos restantes tipos de equipamentos, tipo A e B. Devido à incompatibilidade do sistema mecânico do exaustor com a estratégia de ventilação prevista pela norma, implementado no cenário de reabilitação M6, o dimensionamento do sistema de ventilação natural é baseado no cenário M5.

No Quadro 7.3 são descritos os caudais de ar de admissão e de evacuação de acordo com os caudais-tipo indicados na norma NP 1037-1:2002 (*Quadro 1 e 2*, [20]) para os compartimentos principais e de serviço, em ventilação conjunta.

Quadro 7.3 - Dimensionamento do sistema ventilação natural para aparelhos a gás tipo A e B.

<i>Divisão</i>	<i>Volume (m<sup>3</sup>)</i>	<i>Admissão de ar (m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>)</i>	<i>Evacuação (m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>)</i>	<i>Admissão total (m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>)</i>	<i>Evacuação total (m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>)</i>
Quarto 1	33,0	33+2	-		
Quarto 2	37,3	37,3+7,7	-		
Quarto 3	38,4	38,4+6,6	-	137,6+27,4	
Sala	28,9	28,9+10,1	-		
Cozinha	30,4	-	120 <sup>(1)</sup>		
Instalação sanitária	7,4	-	45		165

<sup>(1)</sup> Potência nominal máxima do aparelho a gás: 28 kW ( $Q_n \leq 120/4,3$ ).

No dimensionamento das grelhas auto-reguláveis a 2 Pa, para a admissão de ar, foram definidas grelhas com caudal nominal de  $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  nas janelas dos quartos 1, 2, 3 e sala, e de  $45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  na cozinha.

A evacuação dos produtos de combustão é realizada através de condutas separadas, dado que um mesmo ramal ou conduta não pode servir simultaneamente aparelhos tipo A e B (esquentador e fogão a gás, por exemplo). Deste modo, é proposto a instalação de uma conduta de evacuação no interior da chaminé existente, aproveitamento grande secção servindo assim, individualmente, a zona do fogão e do aparelho de aquecimento de água quente sanitária.

De acordo com os caudais de exaustão envolvidos, foram dimensionadas condutas individuais de secção circular e lisa com diâmetro  $\phi = 200$  mm e  $\phi = 125$  mm, que servem os aparelhos a gás tipo A ou B (fogão e esquentador, por exemplo) e a conduta que serve a instalação sanitária com  $\phi = 125$  mm. O coeficiente de perda de carga ( $C$ ) destas condutas foi determinado de acordo as expressões (7.3) e (7.4) e que permite simular o comportamento destas condutas através do modelo numérico.

$$C = \frac{113}{\sqrt{2,03 + 0,14 \cdot L}} \quad \text{Se } \phi \geq 200 \text{ mm} \quad \text{e} \quad \frac{A_{\text{livre}}}{A_{\text{conduta}}} \geq 70\% \quad (7.3)$$

$$C = \frac{44,2}{\sqrt{1,93 + 0,14 \cdot L}} \quad \text{Se } \phi \geq 125 \text{ mm} \quad \text{e} \quad \frac{A_{\text{livre}}}{A_{\text{conduta}}} \geq 70\% \quad (7.4)$$

Obtendo, para  $L = 7,5$  m (comprimento da conduta vertical):

- Aparelhos a gás tipo A e B:  $C_1 = 64,5$
- Instalação sanitária:  $C_2 = 25,7$

Nas exigências de ventilação é também definido a permeabilidade ao ar de janelas e portas em função da exposição do edifício ao vento, permitindo a devida estabilidade do esquema de ventilação implementado. Assim, para o edifício estudado, a permeabilidade ao ar da caixilharia exterior deve reflectir os elementos classificativos descritos na NP 1037-1:2002 [20], classe A1 (segundo a Directiva UEAtc para a Homologação de Janelas).

Em resultado das medidas implementadas, descritas anteriormente, obteve-se um  $R_{ph}$  de  $0,72 \text{ h}^{-1}$  ( $N_{ic} = 51,1 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$ ). Estes valores permitem considerar válido o dimensionamento e as alterações implementadas no sistema de ventilação natural, necessárias para instalação de aparelhos a gás tipo A e B.

#### 7.4.8. SÍNTESE DA AVALIAÇÃO DAS OPORTUNIDADES DE MELHORIA

Na situação actual da habitação (M0), as perdas por ventilação correspondem a 57% das necessidades nominais de aquecimento, demonstrando a grande influência da ventilação nas perdas térmicas desta fracção. Nos restantes cenários válidos de melhoria da permeabilidade e da ventilação, as perdas pela renovação e ar são entre 36% e 38%. De salientar, dada a necessidade em garantir a QAI, neste caso de  $0,60 \text{ h}^{-1}$ , e mantendo as restantes soluções construtivas a ventilação corresponde ainda assim a 36% do valor de  $N_{ic}$ .

Tendo em conta as necessidades nominais de aquecimento actuais do edifício, de  $98,4 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$ , através da implementação das melhores propostas de reabilitação (M5, M6 e M7 do Quadro 7.4) regista-se uma melhoria da eficiência energética de 49%.

Com base no resultado estimado do cenário M1, é possível reduzir a taxa de ventilação e obter valores de  $N_{ic}$  razoáveis (decréscimo de 32%) através de meios simples e de menor investimento, como a colocação de vedantes comerciais nas juntas móveis das janelas existentes.

Quadro 7.4 - Melhoria da eficiência energética pela implementação dos cenários de reabilitação.

	M0	M1 <sup>(1)</sup>	M5	M6	M7
$N_{ic}$ (kWh·m <sup>-2</sup> ·ano <sup>-1</sup> )	93,9	63,4	48,8	47,7	47,7
Melhoria (%)		-32%	-48%	-49%	-49%

<sup>(1)</sup> Apesar de  $N_{ic} > N_i$ , em situações de menor capacidade económica é uma opção válida de reabilitação.

#### 7.4.9. COMPARAÇÃO DOS VALORES ESTIMADOS DE $R_{ph}$ E OS DEFINIDOS PELO RCCTE

Resultante deste estudo e da avaliação do efeito de diferentes configurações da envolvente na taxa de renovação do ar, é possível comparar os valores aqui estimados e os valores convencionais de  $R_{ph}$  definidos pelo RCCTE [6] e utilizados para avaliação da eficiência energética de edifícios não conformes com as disposições da norma NP 1037-1:2002 [20].

De acordo com o RCCTE, os edifícios em conformidade com as disposições a NP 1037-1:2002 a taxa de referência global de renovação do ar a adoptar na avaliação da eficiência energética é 0,60 h<sup>-1</sup>. Nas restantes situações é possível estimar a taxa de renovação a adoptar a partir de factores característicos do edifício, como classe de exposição, existência de dispositivos de admissão de ar, classe de permeabilidade das caixilharias e a existência de caixa de estore (Quadro IV.1 [6]). Para o edifício em estudo, e para as diversas configurações da envolvente, o RCCTE conduz aos valores de  $R_{ph}$  indicados na segunda linha do Quadro 7.5. Na primeira linha estão indicados os valores determinados com o modelo numérico validado, permitindo analisar o desvio de valores entre estes e os definidos pelo RCCTE.

Quadro 7.5 - Comparação entre valores de  $R_{ph}$  estimados através do modelo numérico e os definidos pelo RCCTE na avaliação da eficiência energética.

	Cenários								
	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M5* <sup>(2)</sup>
Modelo numérico	1,85	0,80	<0,10	0,17	<0,10	0,64	0,60	0,60	0,72
RCCTE <sup>(1)</sup>	1,00	0,95	0,80	0,85	0,80	0,75	0,75	0,63	0,60
Diferença (%)	-46%	16%	88%	80%	88%	15%	20%	3%	-17%

<sup>(1)</sup> Valores de acordo com o Quadro IV.1 do RCCTE [6] com Exp.1 e sem dispositivos de admissão na fachada. As restantes condições são de acordo com as diversas soluções definidas nos cenários de melhoria.

<sup>(2)</sup> Semelhante ao cenário de reabilitação M5, sendo implementadas medidas permite a conformidade do cenário com a NP 1037:2002,  $R_{ph}$  regulamentar = 0,73 h<sup>-1</sup>.

Dos valores do Quadro 7.5 constata-se, para a situação actual do edifício (M0), que o valor definido pelo RCCTE é conservativo, não estando convenientemente adaptado às características da envolvente de edifícios antigos e da sua elevada permeabilidade.

Nos cenários de reabilitação M2, M3 e M4, verifica-se que o regulamento não enquadra corretamente a baixa permeabilidade ao ar da envolvente proporcionada pelas janelas de classe 3 ou 4, que neste caso conduzem a caudais de ar inferiores aos requisitos mínimos de ventilação. Nos valores definidos pelo RCCTE não é ponderada a influência de intervenções, como a instalação de exaustores na chaminé (efeito de obstrução), na taxa de renovação do ar sendo essa influência demonstrada pela diferença dos valores do cenário de reabilitação M3 face ao M1. Neste sentido, e também como sugestão para trabalhos futuros, o RCCTE deveria aperfeiçoar este aspecto melhorando a sua adaptabilidade e especificidade às diversas soluções construtivas existentes.

Para M1, M5, M6, M7 e M5\*, as diferenças entre os valores simulados e os valores de  $R_{ph}$  do RCCTE são razoavelmente concordantes.

## 8. CONCLUSÕES

### 8.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em função da escassa informação e caracterização experimental do desempenho do sistema de ventilação de edifícios, neste trabalho caracterizou-se experimentalmente e numericamente a permeabilidade ao ar de um edifício “Gaioleiro”.

Dos resultados experimentais obtidos foi possível concluir que as janelas de madeira são responsáveis por cerca de 60% da permeabilidade ao ar da envolvente, evidenciando um elevado potencial de melhoria face a outras intervenções de reabilitação e mesmo através de intervenções simples e económicas (ver Quadro 7.2). Para o estado actual do edifício, o indicador  $n_{50}$  tem o valor de  $16,3 \text{ h}^{-1}$ , o que é muito superior aos valores típicos de edifícios de habitação (entre  $2$  a  $5 \text{ h}^{-1}$ ) [51]. Através da melhoria da permeabilidade ao ar das janelas o valor de  $n_{50}$  foi reduzido para  $7,0 \text{ h}^{-1}$ , que ainda é considerado ser um valor elevado para a permeabilidade ao ar.

Nos ensaios com gases traçadores (velocidade do vento de  $3,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e  $\Delta T$  de  $7^\circ\text{C}$ ) foi possível evidenciar que através da melhoria da permeabilidade ao ar das janelas as infiltrações de ar são significativamente reduzidas (passando de  $0,79$  para  $0,21 \text{ h}^{-1}$ ), podendo mesmo traduzir-se numa renovação de ar insuficiente. Esta é uma situação conhecida e que explica as frequentes ocorrências de condensações e degradação da qualidade do ar interior após a substituição de janelas antigas por outras de reduzida permeabilidade ao ar, sendo evidenciado experimentalmente neste trabalho.

Outra medida normalmente adoptada em contexto de reabilitação ou por iniciativa dos ocupantes, passa pela colocação de exaustores de chaminé de exaustão da cozinha. No âmbito dos ensaios realizados também foi possível evidenciar que esta medida afecta a ventilação geral e permanente da habitação (redução de  $0,60 \text{ h}^{-1}$ ), apesar de poder assegurar a adequada evacuação dos produtos resultantes da cocção dos alimentos.

Com os resultados experimentais da permeabilidade ao ar da envolvente e da perda de carga da chaminé da cozinha, foi desenvolvido e implementado o modelo numérico de ventilação da habitação. Este modelo foi validado com os resultados dos três ensaios com gases traçadores, que permitem evidenciar a adequada implementação do funcionamento da chaminé e da permeabilidade ao ar da envolvente.

Com o modelo de simulação validado e com os dados climáticos de referência de Lisboa relativos à estação de aquecimento (1 de Novembro a 10 de Abril), foi avaliada a taxa média de renovação de ar da habitação para a configuração actual e para diversas soluções de melhoria da permeabilidade ao ar (ver Subcapítulo 7.3). Nestas avaliações pretendeu-se reproduzir as habituais intervenções de reabilitação e estimar a sua influência na taxa média de renovação de ar, nas necessidades

nominais de energia útil de aquecimento, e, ainda, o enquadramento regulamentar dessas intervenções.

Com a implementação de melhorias ao nível das janelas e do sistema de ventilação, conclui-se da simulação do edifício no seu estado actual ser possível reduzir de forma relevante (aproximadamente 50%), as necessidades térmicas de aquecimento actuais. De salientar que, de acordo com os valores relativos às perdas térmicas e ganhos solares da habitação na situação actual (intervindo unicamente na ventilação da habitação) o valor máximo da taxa de renovação do ar que permite assegurar a eficiência energética ( $N_{ic} < N_i$ ) é de  $0,38 \text{ h}^{-1}$ , ou seja, inferior ao permitido regulamentarmente ( $0,60 \text{ h}^{-1}$ ).

Deste estudo concluiu-se que as habituais práticas de reabilitação ou melhoria recorrendo à substituição da caixilharia exterior por outra de menor permeabilidade, permitem melhorar efectivamente as condições de conforto térmico e de eficiência energética. No entanto, estas medidas podem conduzir à redução significativa da taxa média de renovação de ar, para valores inferiores ao mínimo requerido para assegurar a qualidade do ar interior. Os resultados dos cenários M2 e M4 evidenciam esta situação, onde a redução da permeabilidade ao ar da envolvente têm como inconveniente a ventilação insuficiente (inferior a  $0,10 \text{ h}^{-1}$ ), obrigando a que seja necessária a introdução de grelhas de ventilação).

Concluiu-se também que a acção negativa de intervenções de obstrução na condução de exaustão da chaminé, associada à instalação de exaustores, tem uma influência decisiva na taxa média de renovação de ar. A influência destas acções são tanto ou mais significativas nestes edifícios “Gaioleiros” dada generosa secção da condução ( $1,00 \times 0,25 \text{ m}^2$ ), que constitui um elemento de grande capacidade de exaustão de ar, sobretudo na estação de aquecimento. A influência da chaminé no sistema de ventilação é acrescida por gerar importantes caudais de ventilação sob condições desfavoráveis como a ausência de vento. A menor protecção ao vento da cobertura, comparativamente com as fachadas, permite em períodos de vento fraco (ou nulo) induzir a admissão de “ar novo” pelas aberturas na envolvente, neste sentido é importante manter a abertura da chaminé desobstruída. Este fenómeno foi evidenciado nos resultados da monitorização realizada aos diferenciais de pressão (ver Secção 3.3.4).

Pela comparação dos cenários M1 e M3 regista-se que o decréscimo do  $R_{ph}$  de  $0,80 \text{ h}^{-1}$  para  $0,17 \text{ h}^{-1}$  deve-se, exclusivamente, à instalação de exaustor na condução da chaminé. Assim, nestas soluções de reabilitação, é essencial a compensação com a instalação de aberturas de admissão de ar (grelhas de ventilação) para assegurar a admissão “controlada” do caudal de “ar novo”.

As grelhas auto-reguláveis a instalar nos edifícios devem assegurar caudais de ventilação constantes e independentes das condições exteriores, nomeadamente da intensidade do vento. No entanto em períodos de menor intensidade ou ausência de vento incidente nas fachadas do edifício, os baixos caudais de ventilação que resultam do efeito de gradiente térmico não são suficientes para a correcta ventilação do espaço interior. Na simulação dos cenários de reabilitação que incluem

estas grelhas (M5 e M6), verificou-se novamente a importância da chaminé na exaustão do ar interior, traduzindo-se num maior ou menor número de grelhas consoante a conduta da chaminé é ou não selada. Efectivamente, por forma a assegurar a taxa de renovação de ar em  $0,60 \text{ h}^{-1}$ , com a selagem da chaminé (M6) o caudal nominal das grelhas corresponde a  $2,11 \text{ h}^{-1}$  da habitação (sendo considerado excessivo), enquanto com a abertura da chaminé desobstruída (M5) o caudal nominal das grelhas é de  $0,62 \text{ h}^{-1}$ . Dada a grande espessura das paredes exteriores (entre 0,60 e 1,00 m) e a sua constituição (alvenaria de pedra ordinária), a instalação de grelhas na fachada não é exequível, assim é aconselhável a instalação na caixilharia exterior dos vãos envidraçados. Esta situação pode ser igualmente inexecutável caso seja necessário instalar um elevado número de grelhas.

No caso específico deste edifício que se encontra relativamente abrigado da acção do vento (situação típica em meio urbano), para assegurar uma taxa média de renovação de ar de  $0,60 \text{ h}^{-1}$ , por ventilação natural, verifica-se ser necessário dotar o edifício de grelhas de admissão de ar na fachada (soma dos caudais nominais das grelhas  $0,62 \text{ h}^{-1}$ ), bem como ser necessário manter uma conduta de exaustão natural de ar na cozinha. Caso a conduta de exaustão da cozinha seja obstruída, a taxa média de renovação de ar de  $0,60 \text{ h}^{-1}$  apenas seria alcançada com a instalação de 3,4 vezes mais grelhas do que no caso anterior.

Integrando as medidas de melhoria da permeabilidade ao ar da envolvente, anteriormente descritas (por exemplo o cenário M5), que permitem assegurar a taxa mínima de renovação de ar de  $0,60 \text{ h}^{-1}$ , e as melhorias de comportamento térmico avaliadas noutro estudo realizado para mesmo edifício [50], estima-se uma redução de 83% no valor das necessidades nominais de energia útil de aquecimento ( $N_{ic}$ ) relativamente à situação actual. Portanto, complementando as melhorias segundo estas duas vertentes (térmica e ventilação) ou somente aplicando melhorias referentes ao sistema de ventilação, é evidente o elevado potencial de conservação de energia destes edifícios “Gaioleiros”.

Face à actual situação económica, é de salientar que com este estudo se pretendeu expor a viabilidade de medidas simples e de baixo custo na melhoria da permeabilidade ao ar da envolvente e a da sustentabilidade da construção (reabilitação).

## 8.2. PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

Parte da presente dissertação resultou na caracterização experimental da permeabilidade ao ar da envolvente que possibilitou determinar importantes parâmetros, como o indicador  $n_{50}$ , não existindo qualquer estudo ou valor indicativo relativo a este tipo de edificado. A escassa caracterização experimental existente em Portugal é um dos aspectos a desenvolver. Neste sentido, sugere-se a realização de uma vasta campanha experimental (composta por ensaios de pressurização) no

diverso edificado nacional permitindo constituir uma base de dados dos principais parâmetros caracterizadores da permeabilidade ao ar da envolvente. Os ensaios de pressurização permitirão também caracterizar os diversos componentes da envolvente e a perda de carga das condutas de exaustão (chaminés de cozinhas, lareiras, etc.).

Paralelamente, os ensaios com gás traçador possibilitam a determinação directa das taxas de renovação horárias, um importante indicador do correcto funcionamento dos sistemas de ventilação implementados e da conformidade regulamentar com os requisitos de qualidade do ar interior. Sugere-se, identicamente à situação anterior, a realização de uma vasta campanha experimental com fim à avaliação e estudo do efectivo comportamento dos sistemas de ventilação face ao dimensionado pelos projectistas.

No desenvolvimento do modelo numérico do sistema de ventilação verificou-se a fraca adaptabilidade dos coeficientes de pressão ( $C_p$ ), indicados por normas e bibliografia aplicável a esta temática, à diversidade de factores intervenientes nestes valores (direcção do vento, rugosidade do espaço envolvente, obstáculos, geometria do edifício, orientação das fachadas, etc.). Neste sentido propõe-se o desenvolvimento de ferramentas informáticas de simulação, permitindo a determinação dos valores de  $C_p$  de forma expedita e económica (comparativamente aos ensaios em túnel de vento).

Como já referido na Secção 7.4.9, o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) [6] deve aperfeiçoar os valores convencionais de  $R_{ph}$  apresentados no *Quadro IV.1*. De acordo com as conclusões elaboradas no presente trabalho (ver Secção 7.4.9), sugere-se melhorar a adaptabilidade e especificidade às diversas soluções construtivas existentes, nomeadamente aspectos como a existência de janelas de elevada estanqueidade ao ar e o efeito de aparelhos, tais como exaustores, em condutas de exaustão.

**BIBLIOGRAFIA**

1. APPLETON, J. **Reabilitação de Edifícios Antigos e Sustentabilidade**. 6.º Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Civil. Évora: [s.n.]. 2010.
2. ISOLANI, P. **Eficiência energética nos edifícios residenciais**. Lisboa: Ondagrafe, 2008.
3. INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA. **Censos 2011 – Resultados Preliminares**. 2011. ed. Lisboa: INE, 2011.
4. INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA. **Estatísticas da Construção e Habitação 2006**. Lisboa: INE, 2007.
5. DECRETO-LEI N.º 40/1990. **Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios**. Lisboa: [s.n.], 1990.
6. DECRETO-LEI N.º 80/2006. **Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE)**. Lisboa: [s.n.], v. I Série-A, 2006.
7. SILVA, F.; PINTO, A. Avaliação experimental da permeabilidade ao ar da envolvente e dos sistema de ventilação. Edifício "Gaioleiro". In: CONSTRUÍDO, I. -I. I. P. A. S. D. A. **Sustentabilidade na Reabilitação: O Novo Paradigma do Mercado da Construção**. Lisboa: [s.n.], 2011. Cap. 3, p. 187-194.
8. EN 15242:2007. **Ventilation for buildings - Calculation methods for the determination of air flow rates in buildings including infiltration**. Brussels: CEN, 2007.
9. FRANÇA, J. **Lisboa Pombalina e o Iluminismo**. Lisboa: Bertrand, 1987.
10. APPLETON, J. **Reabilitação de Edifícios “Gaioleiros”**. 1 edição. ed. Lisboa: [s.n.], 2003.
11. MASCARENHAS, J. **Evolução do Sistema Construtivo dos Edifícios de Rendimento da Baixa Pombalina em Lisboa, Relacionada com as Condições Sísmicas do Local**. 3º Encontro Sobre Sismologia e Engenharia Sísmica. Lisboa: IST. 1997.
12. MATEUS, J. M. et al. **Reabilitação Urbana. Baixa Pombalina: bases para uma intervenção de salvaguarda**. Lisboa: Direcção Municipal de Gestão Urbanística, 2005.
13. FERREIRA, M. **Relatório de trabalhos arqueológicos - Rua do Jardim do Tabaco**. Lisboa. 2009.
14. ALDER VENTICONTROL. **VMC Y la vivienda respira!**, Leganés, 2010.
15. AWBI, H. **Ventilation of buildings**. 2nd. ed. New York: Taylor & Francis Group, 2005.
16. LIDDAMENT, M. W. **A Guide to Energy Efficient Ventilation**. Coventry: AIVC, 1996.
17. BS 5925:1991. **Code of practice for ventilation principles and designing for natural ventilation**. London: BSI, 1991.
18. EN 12207:1999. **Windows and doors - Air permeability - Classification**. Brussels: CEN, 1999.
19. WUNDERGROUND. Weather Stations. **Weather Underground**, 2011. Disponível em: <<http://www.wunderground.com/>>.
20. NP 1037-1:2002. **Ventilação e evacuação dos produtos da combustão dos locais com aparelhos a gás. Parte 1: Edifícios de habitação. Ventilação natural**. Monte da Caparica: IPQ, 2002.
21. FERREIRA, M. **Caudais de ventilação recomendados em edifícios residenciais**. Porto: Faculdade de Engenharia, 2004.
22. MANSOURI, Y.; ALLARD, F.; MUSY, M. **Proceedings of Building Simulation**. Conceptual Implementation of Natural Ventilation Strategy - 8th International IBSA Conference. Eindhoven: [s.n.].

2003. p. 815-822.
23. PINTO, A. Limites para a permeabilidade ao ar da envolvente de edifícios. Eficiência energética e qualidade do ar interior. In: LNEC, J. - **Cadernos Edifícios - Ventilação e da qualidade do ar interior**. Lisboa: LNEC, v. 6, 2011. p. 83-97.
24. RENSON COPORATION. RENSON Export. **RENSON Ventilation**, 2011. Disponível em: <<http://export.renson.eu/Ventilation-Export.html>>. Acesso em: 3 Setembro 2011.
25. ARMANDO, P. **Aplicação da avaliação de ciclo de vida à análise energética e ambiental de edifícios**. Lisboa: IST, 2008.
26. EN 13829:2000. **Thermal performance of buildings - Determination of air permeability of buildings - Fan pressurized method**. Brussels: CEN, November 2000.
27. EN ISO 12569:2000. **Thermal insulation in buildings - Determination of air change in buildings - Tracer gas dilution method**. Brussels: CEN, 2000.
28. ASHRAE. Ventilation and infiltration. In: \_\_\_\_\_ **Handbook of Fundamental**. Atalanta, GA: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 2001. Cap. 26.
29. AMARAL, M. **Sistemas de ventilação natural e mistos em edifícios de habitação**. Porto: Tese de Doutoramento, FEUP, 2008.
30. SILVA, A. **Caracterização das infiltrações médias anuais em edifícios portugueses através do método de pressurização**. Porto: Tese de Mestrado FEUP, 1991.
31. TOLEDO, E. **Ventilação Natural dos Edifícios**. Lisboa: LNEC, 1967.
32. LACERDA, M.; LEITÃO, M. D. F. Instituto de Gestão do Património Arquitectónico e Arqueológico. **IGESPAR**, 2011. Disponível em: <<http://geo.igespar.pt/website/lisboa/viewer.htm>>. Acesso em: 20 Agosto 2011.
33. TRANSTEJO, G. Meteo Transtejo. **Estação meteorológica - Cais do Sodré**, 2011. Disponível em: <<http://meteo.transtejo.pt/historico.php>>. Acesso em: 5 Maio 2011.
34. ALCOFORADO, M. **O clima da região de Lisboa. Contrastes e ritmos térmicos**. Lisboa: Centro de Estudos Geográficos, 1992.
35. ALCOFORADO, M. et al. **Orientações climáticas para o Ordenamento em Lisboa**. Lisboa: Centro de Estudo Geográficos, Universidade de Lisboa, 2005.
36. ALCOFORADO, M.; LOPES, A. **Wind fields and temperature patterns in Lisbon (Portugal) and their modification due to city growth**. Fifth International Conference on Urban Climate. Lotz, Poland: [s.n.]. 2003.
37. ALCOFORADO, M. Brisas estivais do Tejo e do Oceano na região de Lisboa. **Finisterra. Revista Portuguesa de Geografia**, Lisboa, 1987. 71-112.
38. U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Energy Plus. **Energy Efficiency and Renewable Energy**, 2011. Disponível em: <[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata\\_sources.cfm#INETI](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_sources.cfm#INETI)>. Acesso em: 23 Julho 2011.
39. AUTODESK CORPORATION. Project Vasari. **Autodesk Labs**, 2011. Disponível em: <<http://labs.autodesk.com/utilities/vasari/>>. Acesso em: 10 Agosto 2011.
40. LOPES, A. M. S. **Modificações no Clima de Lisboa como Consequência do crescimento urbano - Vento, Ilha de Calor de Superfície e Balanço Energético**. Lisboa: Universidade de Lisboa, v. Douturamento em Geografia Física, 2003.
41. DECRETO-LEI N.º 253/1983. **Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e**

- Pontes (RSA)**. I Série. ed. Lisboa: Diário da República, 31 de Maio 1983.
42. TNO APPLICATIONS. Cp Generator. **Cp Generator**, 2011. Disponível em: <<http://cpген.bouw.tno.nl/cp/>>. Acesso em: 30 Abril 2011.
43. EN 13465:2004. **Ventilation of buildings - Calculation methods for the determination of air flow rates in dwellings**. Brussels: CEN, 2004.
44. GOMES, M. G. **Accção do vento em edifícios - Determinação de coeficientes de pressão em edifícios em L e U**. Lisboa: IST, 2003.
45. LIDDAMENT, M. W. **Annex V - Air Infiltration Calculation Techniques - An Applications Guide**. Coventry: The Air Infiltration and ventilation Center, 1986.
46. ADENE. **Reabilitação energética da envolvente de edifícios residenciais**. Lisboa: DGGE / IP-3E, 2004.
47. DECRETO-LEI N.º 79/2006. **Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização (RSECE)**. Lisboa: [s.n.], v. I Série-A, 4 de Abril.
48. LI, M. S. Ms. Shirley Li - Store No. 201178. **Aliexpress**, 2011. Disponível em: <<http://www.aliexpress.com/fm-store/201178>>. Acesso em: 2 Setembro 2011.
49. ALVES, B. M. R. D.; MACEDO, C. L. F. L. D. **Projecto de execução - Remodelação e Ampliação de edifícios de habitação e de comércio**. Lisboa: [s.n.], 2010.
50. MAMEDE, M. **Caracterização experimental e numérica do desempenho térmico de um edifício "Gaioleiro". Identificação de oportunidades de melhoria**. Lisboa: LNEC - ISEL, v. Dissertação, 2011.
51. EN ISO 13790:2008. **Thermal performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling (ISO 13790: 2008)**. Brussels: CEN, 2008.



# **ANEXOS**



**ANEXO A – ELEMENTOS DE APOIO AOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS**

**A.1 – FICHA DE IDENTIFICAÇÃO DO EDIFÍCIO**

**A.2 – PROCEDIMENTO – ENSAIO DE PRESSURIZAÇÃO**

**A.3 – PROCEDIMENTO – ENSAIO DE GÁS TRAÇADOR**

**A.4 – RELATÓRIO - ENSAIO DE PRESSURIZAÇÃO**

**A.5 – RELATÓRIO – ENSAIO DE GÁS TRAÇADOR**



**ANEXO A.1 - FICHA DE IDENTIFICAÇÃO DO EDIFÍCIO**



## FICHA DE IDENTIFICAÇÃO

Pág.: 1 de 1

Processo n°

### 1. INFORMAÇÃO DO CLIENTE

OBSERVAÇÕES

Nome:	
Morada:	
Contacto:	

### 2. INFORMAÇÃO DO TÉCNICO

Nome:	
Telemóvel:	
Correio electrónico:	
Empresa:	
Ensaios a realizar:	

### 3. INFORMAÇÃO DO EDIFÍCIO

Morada:	
Data de construção:	
Tipologia:	
Estado de conservação:	
Tipo de aquecimento, ventilação e AC:	

### 4. CARACTERIZAÇÃO DA HABITAÇÃO/EDIFÍCIOS

Pavimento (m <sup>2</sup> ):	
Pé-direito (m):	
Volume (m <sup>3</sup> ):	
Área da envolvente (m <sup>2</sup> ):	
Área de vãos envidraçados (m <sup>2</sup> ):	
Exposição ao vento (Não protegido/Normal/Protegido):	

### 5. OUTROS ELEMENTOS

---

---



**ANEXO A.2 - PROCEDIMENTO – ENSAIO DE PRESSURIZAÇÃO**



**REGISTO DE REVISÕES**

Revisão	Resumo de Alterações	Data
00	n/a	4.03.2011

**1. GENERALIDADES**

**1.1. OBJECTIVO E CAMPO DE APLICAÇÃO**

Este ensaio consiste, com recurso a uma “porta ventiladora”, na pressurização e ou despressurização do espaço interior de uma habitação ou compartimento e o registo do caudal de ar, necessário movimentar para gerar um determinado diferencial de pressão ( $\Delta p$ ) entre o espaço interior e o ambiente exterior. Este ensaio tem como propósito a caracterização da permeabilidade ao ar da envolvente de um edifício ou parte deste, permitindo obter diversas análises e diagnósticos relativos às infiltrações, destacando-se:

- medição da permeabilidade ao ar e a verificação da sua conformidade com a regulamentação aplicável;
- comparação da permeabilidade ao ar relativa de diversos edifícios ou partes destes, e;
- identificação dos locais de fuga de ar;

De salientar que a taxa de renovação de ar, ocorrida pela infiltração de ar através da envolvente, não é uma medição directa sendo determinada por meio de cálculo. Outros métodos, como de gás traçador, permitem obter directamente a taxa de renovação de ar.

O ensaio permite ainda determinar os coeficientes característicos da permeabilidade ao ar da envolvente resultante de medidas de melhoria implementadas e, através de múltiplos ensaios em situações distintas, dos diversos componentes que compõem a envolvente, como pavimento, tecto, janelas, fachada e chaminé.



Figura 1 – Imagem geral do equipamento utilizado no ensaio de pressurização.

O espaço de ensaio é pressurizado e ou despressurizado com um caudal de ar variável permitindo, deste modo, alcançar uma determinada gama de valores de pressão diferencial ( $\Delta p$ ) entre 10 Pa e 60 Pa definindo assim vários pontos de correlação. Esta gama de pressões diferenciais é significativamente superior às pressões geradas naturalmente, e tem por objectivo minimizar a influência dos mecanismos de ventilação (vento e temperatura) sobre os resultados de ensaios. Em habitações com elevada permeabilidade ou de elevado volume ( $> 4000 \text{ m}^3$ ) não é possível atingir os diferenciais de pressão máximos, pelo que a gama de pressões deve ser alterada com, se possível, incrementos mínimos de 10 Pa e cinco pontos de leitura.

Em geral, as frinchas conferem um comportamento variável ao fluxo de ar infiltrado, esta situação é observável pela não sobreposição das curvas de pressurização e de despressurização. Este fenómeno é exposto pelo comportamento diferenciado, por exemplo, das janelas de batente, nas quais a junta móvel é fechada no ensaio de pressurização e

aberta no ensaio de despressurização aumentando a permeabilidade ao ar do elemento. Deste modo, é recomendado realizar dois conjuntos de ensaios, de pressurização e despressurização.

A porta ventiladora permite ainda auxiliar na identificação das principais frinchas que contribuem na troca de ar entre o espaço interior e o ambiente exterior, utilizando o gerador de fumos durante a pressurização do espaço. Esta identificação permitirá, eventualmente, reunir informações importantes na elaboração de soluções de melhoria da permeabilidade.

## 1.2. DOCUMENTOS RELACIONADOS



EN 13829:2000 - Thermal performance of buildings - Determination of air permeability of buildings - Fan pressurization method (ISO 9972:1996, modified), November 2000.



Operation Manual for Model 3 and Model 4 Systems, Minneapolis Blower Door™ - The ENERGY CONSERVATORY

(<http://www.energyconservatory.com/download/bdmanual.pdf>)

## 1.3. EQUIPAMENTO

- Equipamento *Minneapolis Blower Door™* (inclui ventilador, anéis, APT (*Automated Performance Testing System™*), controlador de velocidade do ventilador, moldura da porta ajustável, capa de nylon e três tubos plásticos coloridos);
- AIRFLOW TA460, medição de diferencial de pressão;
- HygroLog HL-NT data logger, medição de humidade, temperatura e pressão barométrica;
- Computador portátil com o *software* TECTITE, registo das leituras e determinação de parâmetros, e;
- Gerador de fumos, localização das principais frinchas.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. CONDIÇÕES DE MEDIÇÃO

A precisão dos dados experimentais registados neste ensaio depende da calibração dos equipamentos envolvidos, segundo as especificações do fabricante, e das condições ambientais presentes a quando do ensaio. Nesta última situação, caso a diferença de temperatura entre exterior interior (K) multiplicada pela altura da envolvente do edifício (m) resulte num valor superior a 500.m.K é provável que a diferença de pressão entre o espaço interior e o ambiente exterior não seja satisfatória. Identicamente para ventos superiores a 6 m/s. A velocidade e direcção do vento, podem ser determinados através dos valores registados em estações meteorológicas próximas do local de ensaio e, eventualmente, corrigidos devido à diferença de rugosidade entre estes locais.

**Nota:** Registo das principais estações meteorológicas, disponível em: <http://www.wunderground.com/>

### 2.2. PREPARAÇÃO DO ESPAÇO DE ENSAIO

Dependendo da finalidade dos ensaios de pressurização, são especificados dois métodos de ensaio, método A e B. O método A permite determinar a permeabilidade ao ar de um edifício ou compartimento em plena utilização, estando as aberturas e sistemas de aquecimento ou arrefecimento na condição normal de utilização. O método B permite efectivamente a avaliação da permeabilidade ao ar da envolvente encerrando todas as aberturas exteriores intencionais.

Neste sentido, segundo o método B, todos os elementos do edifício com aberturas para o exterior (janelas, portas, etc.) devem estar fechados. Os elementos interiores, à excepção de armários, vestuários, e outros do género, devem estar abertos permitindo uma pressão uniforme em todas as áreas em ensaio. Em edifícios servidos por sistemas de aquecimento, ventilação mecânica ou ar-condicionado, estes devem estar desligados. Nos edifícios parcialmente

degradados e em situações onde, na condição normal de ocupação da habitação não se prevejam aberturas, todos os que permitem a comunicação directa entre o espaço interior e o ambiente exterior devem ser selados. São exemplos, a ausência de sifonagem dos aparelhos sanitários, juntas pronunciadas nos elementos da caixilharia exterior e elementos danificados na envolvente (vidros partidos, etc.).

Entre os vários ensaios deve ser verificado eventuais falhas na selagem em toda a área de ensaio.



Figura 2 – Exemplo de selagem de algumas aberturas.

## 2.3 MONTAGEM DE EQUIPAMENTO

### 2.3.1 Moldura ajustável

É preferível a montagem da moldura ajustável numa porta do edifício com ligação para o exterior, normalmente a porta principal, e orientada para um espaço interior aberto e amplo. A moldura é ajustável em altura e largura, não devendo ser instalada em zonas com obstruções próximas ao fluxo de ar gerado pelo ventilador. O mecanismo de ajuste permite o seu posicionamento e fixação nas diversas e usuais dimensões de aros de portas. O processo de instalação deve ser realizado a partir do interior da área a ensaiar com as seguintes etapas:

- ajustar (em altura e largura) a moldura ao aro da porta;
- remover a moldura e colocar a capa de *nylon*. As fitas de *velcro* permitem a fixação da capa não devendo apresentar folgas, e;
- fixar a moldura e capa no aro da porta e colocar as travessas da moldura, fixando firmemente todos os elementos ao aro da porta. Não deve existir qualquer folga entre a capa e o aro da porta.



Figura 3 – Exemplo da montagem da porta ventiladora.

### 2.3.2 Aparelhos e tubos

Os equipamentos de ensaio são, usualmente, instalados no interior da habitação e controlados, pelo operador, também no seu interior durante qualquer dos dois tipos de ensaio (pressurização e despressurização). O aparelho *APT*, permite a leitura das várias pressões (exterior, interior e junto ao ventilador) e da velocidade do ventilador, sendo estes dados transmitidos para *software* “TECTITE”, este equipamento deve ser colocado junto ao portátil (ver Figura 1). A configuração dos tubos coloridos, que permitem determinar os valores das pressões envolvidas no ensaio, devem ser conectados conforme a Figura 4.

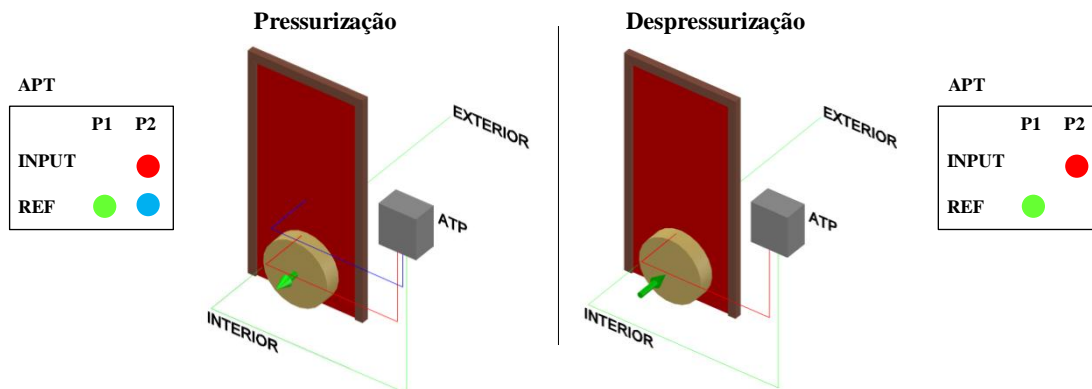


Figura 4 – Código de ligação dos tubos coloridos entre a porta ventiladora e APT.

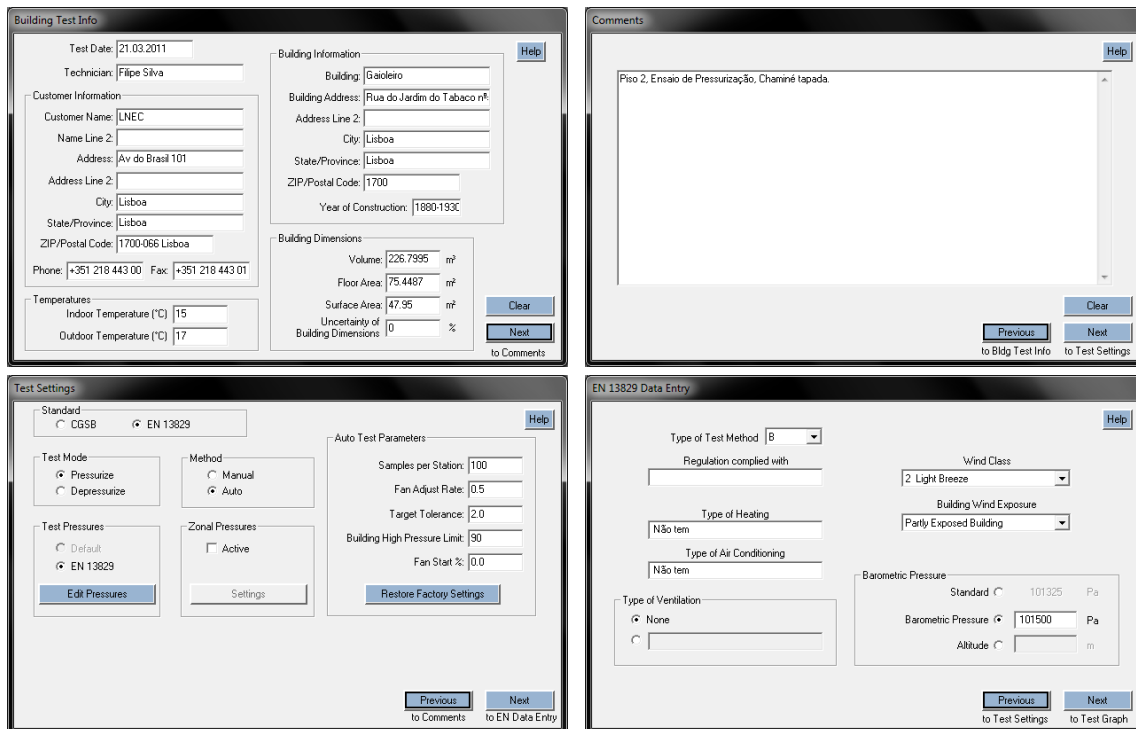
### 2.3.3 Introdução prévia de dados - *Software* “TECTITE”

O controlo do ensaio e registo dos dados são efectuados através do *software* TECTITE.

Devem ser preenchidos todos os campos solicitados pelo *software*, tais como: data de ensaio, identificação do operador e do edifício, temperatura interior e exterior e dimensões do edifício.

A zona de comentário deve conter todas as informações importantes auxiliando na interpretação dos dados de ensaio. Os ensaios podem ser de um só ponto e de múltiplos pontos. Este último, a utilizar nestes ensaios, envolve a pressurização ou despressurização do espaço de ensaio sob uma gama de pressões. Relativamente às definições do ensaio este procedimento encontra-se conformidade com a norma EN13829:2000, sendo as pressões de ensaio as recomendadas por este (60 Pa, 50 Pa, 40 Pa, 35 Pa, 25 Pa, 20 Pa e 15 Pa). O processo de ensaio é automático, tendo como parâmetros o número de amostras (100), taxa de ajuste do ventilador (0,5), tolerância (deve ser ajustado consoante o desenvolvimento do ensaio) e limite superior de pressão do edifício (90).

Nos dados de entrada da norma EN 13829:2000, o ensaio pode ser orientado por dois métodos (A e B). Caso existam sistemas de aquecimento, ar condicionado ou outro, devem ser identificados. Por fim, são definidos os dados relativos à exposição do edifício ao vento, intensidade deste e o valor da pressão barométrica (barómetro de pressão, sendo 1000 mb = 10000 Pa).



**Building Test Info**

Test Date: 21.03.2011  
 Technician: Filipe Silva  
 Customer Information:  
 Customer Name: LNEC  
 Name Line 2:  
 Address: Av do Brasil 101  
 Address Line 2:  
 City: Lisboa  
 State/Province: Lisboa  
 ZIP/Postal Code: 1700-066 Lisboa  
 Phone: +351 218 443 00 Fax: +351 218 443 01  
 Building Information:  
 Building: Gaioleiro  
 Building Address: Rua do Jardim do Tabaco nº:  
 Address Line 2:  
 City: Lisboa  
 State/Province: Lisboa  
 ZIP/Postal Code: 1700  
 Year of Construction: 1880-1930  
 Building Dimensions:  
 Volume: 226,7995 m³  
 Floor Area: 75,4487 m²  
 Surface Area: 47,95 m²  
 Uncertainty of Building Dimensions: 0 %  
 Clear Next to Comments

**Comments**

Piso 2, Ensaio de Pressurização, Chaminé tapada.  
 Clear Previous Next to Bldg Test Info to Test Settings

**Test Settings**

Standard:  CGSB  EN 13829  
 Test Mode:  Pressurize  Depressurize  
 Method:  Manual  Auto  
 Auto Test Parameters:  
 Samples per Station: 100  
 Fan Adjust Rate: 0,5  
 Target Tolerance: 2,0  
 Building High Pressure Limit: 90  
 Fan Start %: 0,0  
 Test Pressures:  Default  EN 13829  
 Zonal Pressures:  Active  
 Edit Pressures Settings Restore Factory Settings  
 Previous Next to Comments to EN Data Entry

**EN 13829 Data Entry**

Type of Test Method: B  
 Regulation complied with:  
 Wind Class: 2 Light Breeze  
 Type of Heating: Não tem  
 Building Wind Exposure: Partly Exposed Building  
 Type of Air Conditioning: Não tem  
 Type of Ventilation:  None  
 Barometric Pressure:  
 Standard:  101325 Pa  
 Barometric Pressure:  101500 Pa  
 Altitude:  m  
 Previous Next to Test Settings to Test Graph

Figura 5 – Exemplo dos dados inseridos num ensaio de pressurização.

## 2.4 CAMPANHA DE ENSAIOS

Em função dos objectivos, deve ser definido uma campanha de ensaios a realizar, descrevendo toda sequência de trabalhos. Os parâmetros característicos da permeabilidade de determinados componentes da envolvente (janelas, chaminé, etc.) são estimados através da subtracção dos resultados de diferentes ensaios. Ex: A determinação dos parâmetros de permeabilidade das janelas é obtida pela subtracção dos resultados de ensaio com as juntas móveis no seu estado normal e os resultados de ensaio com as juntas seladas.



Figura 6 - Exemplo da selagem de juntas móveis das janelas e chaminé.

## 2.5. INÍCIO DE ENSAIO

O ensaio inicia-se ligando os equipamentos (ventilador e controlador de velocidade) e a detecção da *databox* (APT System) pelo *software* TECTITE. Durante o ensaio automático, é solicitado pelo *software* a realização de algumas tarefas como a colocação e remoção da cobertura e dos anéis no ventilador.

A escolha do anel apropriado depende da necessidade de fluxo de ar, para edifícios com elevada estanqueidade recomendam-se anéis menores. Caso não se alcance os valores de pressão necessário (de 60 a 15 Pa) recomenda-se a colocação de anéis com maior abertura.

Nos ensaios que decorram sem qualquer anel e que não seja atingida a pressão mais elevada (60 Pa), significa que o edifício apresenta uma permeabilidade muito elevada, pelo que o ensaio deve ser realizado apenas com pressões abaixo do máximo alcançado anteriormente.

## 2.5. TRATAMENTO DOS RESULTADOS

### 2.5.1 Valores de referência

O volume interior,  $V$ , é o volume de ar interior do edifício ou parte deste. O volume interior é calculado pela multiplicação da área útil pelo pé direito. A área da envolvente,  $A_E$ , da habitação (ou parte) é a área de toda a superfície de pavimento, paredes e tectos que fazem fronteira entre o exterior e o espaço interior. A área útil,  $A_F$ , é a soma das áreas de todos os compartimentos da habitação, incluindo vestíbulos, circulações interiores, instalações sanitárias, arrumos, outros compartimentos de função similar e armários nas paredes, e mede-se pelo perímetro interior das paredes que limitam o fogo, descontando encaixos até 30 cm, paredes interiores, divisórias e condutas.

### 2.5.2 Parâmetros das equações de permeabilidade

Os resultados destes ensaios são expressos através de gráficos bi-logarítmicos, indicando o respectivo valor dos dois coeficientes,  $n$  e  $C$ , que traduzem as características de permeabilidade ao ar da envolvente, expressão (1):

$$Q = C \cdot (\Delta p)^n \quad (1)$$

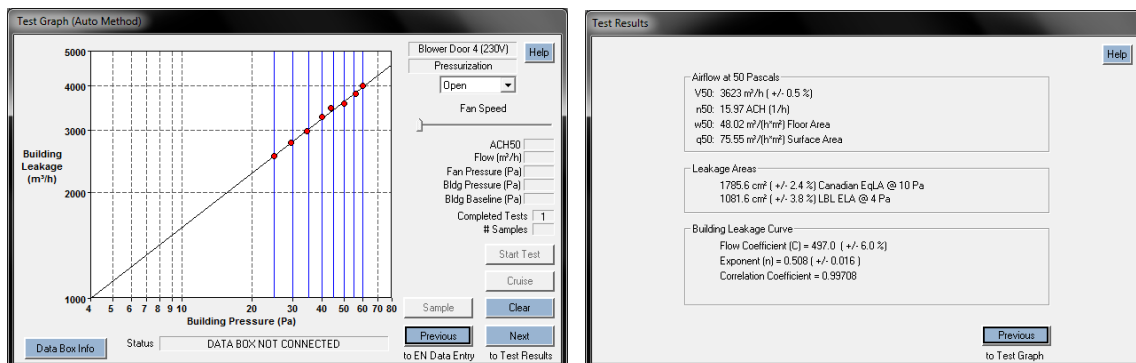


Figura 7 – Exemplo do gráfico bi-logarítmico e dos resultados de ensaio.

O expoente  $n$  toma valores compreendidos tipicamente entre 0,5 para escoamento turbulento (frinchas de pequena dimensão) e 1,0 para escoamento laminar (aberturas de grande dimensão), podendo ter valores fora desta gama quando existe também variação da dimensão das frinchas

Os resultados obtidos nos ensaios integram já as conversões necessárias associadas à densidade do ar exterior e interior devido à temperatura (inserido previamente no *software* “TECTONIC”).

### 2.5.3 Indicadores

Este ensaio é frequentemente utilizado na comparação de edifícios, tipo de construção, entre outros, pelo indicador  $n_{50}$ , sendo estimado através múltiplos pontos de leitura ou apenas um ponto correspondente ao diferencial de pressão

de 50 Pa. Este indicador, que expressa a permeabilidade a 50 Pa por unidade de volume, corresponde ao caudal de ar escoado através da envolvente ( $\text{m}^3\text{h}^{-1}$ ), com  $\Delta p = 50$  Pa, a dividir pelo volume interior do espaço ensaiado ( $\text{m}^3$ ), expressão (2).

$$n_{50} = \frac{Q_{50}}{V} \quad (2)$$

Outros indicadores permitem, também, apoiar outras análises na comparação entre edifícios como, a permeabilidade ao ar da envolvente com  $\Delta p = 50$  Pa, por unidade de área da envolvente, equação (3), ou por unidade de área de pavimento, expressão (4).

$$q_{50} = \frac{Q_{50}}{A_E} \quad (3)$$

$$w_{50} = \frac{Q_{50}}{A_F} \quad (4)$$

Quando as várias áreas são inseridas previamente no *software* de ensaio, estes indicadores integram a folha de resultados de ensaio.

## 2.6. LOCALIZAÇÃO DE FRINCHAS

Utilizando a porta ventiladora, funcionando a velocidade constante e pressurizando o espaço, é introduzido para o interior da habitação ou compartimento fumo branco, produzido pelo gerador de fumos, e que permite a detecção das principais frinchas. A detecção é feita através da observação visual, pelo exterior, a saída de fumo branco.

Apesar do fumo gerado não ser tóxico, não é recomendável a presença de qualquer pessoa no interior do espaço em ensaio.



Figura 8 – Gerador de fumo branco e ventilador, insuflando o espaço interior com fumo. Neste exemplo, dada a permeabilidade do pavimento, o fumo branco foi detectado no piso inferior.

## 3. RELATÓRIO DE ENSAIO

Durante a execução dos ensaios deve ser preenchido o relatório de ensaio, permitindo registar todas as informações importantes e necessárias a futuras observações e interpretações dos dados de ensaio. O relatório de ensaio é composto pelo formulário preenchido, gráficos de pressurização e ou despressurização do espaço ensaiado e qualquer outro elemento relevante ao ensaio.



**ANEXO A.3 - PROCEDIMENTO – ENSAIO DE GÁS TRAÇADOR**



**PROCEDIMENTO – ENSAIO DE GÁS TRAÇADOR**

Pág.: 1 de 5

**REGISTO DE REVISÕES**

Revisão	Resumo de Alterações	Data
00	n/a	4.03.2011

**1. GENERALIDADES****1.1. OBJECTIVO E CAMPO DE APLICAÇÃO**

Este ensaio consiste na injeção e monitorização da concentração de um gás ao longo do tempo de ensaio, permitindo a medição directa da taxa de renovação de ar horária em determinado compartimento ou habitação. Existem modos distintos de quantificar as renovações de ar, dependendo do regime de concentração do gás mantido ao longo do ensaio:

- injeção única no início do ensaio;
- injeção constante ao longo do ensaio, e;
- injeção variável ao longo do ensaio.

A selecção do tipo de gás traçador deve ter em consideração a sua natureza, nomeadamente a não toxicidade, estabilidade química, não absorvível por materiais ou componentes do edifício, densidade próxima ao do ar interior e, por fim, presença na atmosfera a baixa concentração permitindo a fácil detecção e monitorização. Os gases mais comuns nestes ensaios são o óxido nitroso ( $N_2O$ ), hexafluoreto de enxofre ( $SF_6$ ), hélio (He) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ), sendo este último o utilizado nos ensaios neste estudo.

O dióxido carbono ( $CO_2$ ) apesar de compreender diversos aspectos positivos, comparativamente com os restantes gases, como o custo e medição através diversas técnicas, apresenta alguns inconvenientes como a absorvência por parte de materiais do edifício e mobiliário conduzindo a resultados de menor rigor. Outro aspecto importante na utilização do  $CO_2$  nestes ensaios, e com influência sobre os resultados experimentais, é a produção adicional no espaço de ensaio do bioflúente  $CO_2$  pela ocupação humana, ou de outros ocupantes. Dado que, actualmente, o registo dos dados de ensaio é efectuado com recurso a sistemas autónomos este último aspecto não é condicionante. O meio de medição e monitorização da concentração mais utilizado, actualmente, é com analisadores de gás, face à capacidade de aquisição automática em intervalos de tempo definidos, precisão e custo.

**1.2. DOCUMENTOS RELACIONADOS**

EN 12569 - Thermal insulation in buildings - Determination of air change in buildings - Tracer gas dilution method, November 2000.

**1.3. EQUIPAMENTO**

- Telaire 7001 Carbon Dioxide Monitor, analisador da concentração de gás traçador;
- HOBO U12 Temp/RH/2 External Channel Logger, registo dos valores de concentração de gás traçador;
- Portátil com o *software* “HOBOWare”;
- HygroLog HL-NT data logger, medição de humidade, temperatura e pressão barométrica;
- Botija de  $CO_2$ , injeção de gás traçador no espaço de ensaio.

**2. METODOLOGIA****2.1. CONDIÇÕES DE MEDIÇÃO**

A precisão dos dados experimentais registados neste ensaio depende da calibração dos equipamentos envolvidos, segundo as especificações do fabricante, e das condições ambientais presentes a quando do ensaio. De salientar que os resultados obtidos neste ensaio, a taxa de renovação horária do ar, reflectem as condições no qual foi realizado,

## PROCEDIMENTO – ENSAIO DE GÁS TRAÇADOR

Pág.: 2 de 5

sendo importante determinar a velocidade do vento, bem como temperatura exterior e interior registado durante o ensaio. A velocidade e direcção do vento, podem ser determinados através dos valores registados em estações meteorológicas próximas do local de ensaio e, eventualmente, corrigidos devido à diferença de rugosidade entre estes locais.

**Nota:** Registo das principais estações meteorológicas disponível em: <http://www.wunderground.com/>

### 2.2. PREPARAÇÃO DO ESPAÇO DE ENSAIO

Todos os elementos do edifício com aberturas para o exterior (janelas, portas, etc.) devem estar fechados. Os elementos interiores, à excepção de armários, vestuários, e outros do género, devem estar abertos permitindo uma homogeneização do gás em todas as áreas de ensaio. Em edifícios servidos por sistemas de aquecimento, ventilação mecânica ou ar-condicionado, estes devem estar desligados. Nos edifícios parcialmente degradados e em situações onde, na condição normal de ocupação da habitação não se prevejam aberturas, todos os que permitem a comunicação directa entre o espaço interior e o ambiente exterior devem ser selados. São exemplos, a ausência de sifonagem dos aparelhos sanitários, juntas pronunciadas nos elementos da caixilharia exterior e elementos danificados na envolvente (vidros partidos, etc.).



Figura 1 – Exemplo da selagem de algumas aberturas.

### 2.3 MONTAGEM DE EQUIPAMENTO

Numa fase prévia à realização destes ensaios, deve ser estimada a massa de gás traçador a injectar no espaço de ensaio de modo a registar valores dentro do campo de leitura do analisador de gás traçador.

Tomando como exemplo o uso de CO<sub>2</sub> como gás traçador e o limite de leitura de 2500 ppm, temos:

- Massa molar CO<sub>2</sub> = 44,01 g/mol

- Volume molar = 22,71 l/mol

$$\frac{44,01}{22,71} \cdot 2500 \cdot 10^{-6} \cdot V = 0,0048 \cdot V \quad [\text{kg}] \quad (1)$$

sendo,  $V$  = volume interior do espaço de ensaio (m<sup>3</sup>).

O equipamento de ensaio deve ser instalado no centro do espaço de ensaio ou compartimento.



Figura 2 - Analisador de gás. Aparelho de monitorização e registo da concentração utilizado nos ensaios de gás traçador.

## 2.4 CAMPANHA DE ENSAIOS

Em função dos objectivos, deve ser definido uma campanha de ensaio a realizar descrevendo toda sequência de trabalhos. Através da selagem de determinados componentes, como juntas móveis das janelas, é possível determinar directamente a redução da taxa de renovação horária do ar em resultado de, por exemplo, a melhoria da permeabilidade (reabilitação) das janelas existentes.



Figura 3 - Exemplo da selagem de juntas móveis das janelas e chaminé.

## 2.5. INÍCIO DE ENSAIO

O ensaio inicia-se com a introdução do gás traçador, CO<sub>2</sub>, de modo uniforme por todo o espaço, até à concentração pretendida ou o de limite de detecção do analisador de gás. Para a correcta a mistura de gás traçador e ar interior, deve ser utilizado, em simultâneo com a injeção, ventiladores ou outros meios para a correcta homogeneização com o ar interior, garantindo em todas as zonas do espaço de ensaio uma concentração uniforme de gás traçador. O desvio na concentração entre diferentes zonas não deve ser superior a 10% do valor médio.

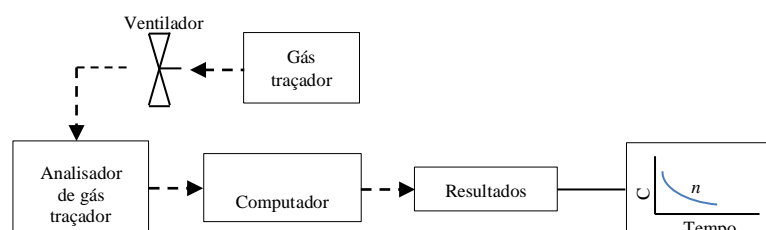


Figura 4 - Esquema de ensaio de gás traçado pelo método do decaimento ou declive.

## 2.6. TRATAMENTO DOS RESULTADOS

A variação na concentração de gás traçador é dada pela quantidade de gás gerado no interior do espaço de ensaio somando a quantidade de gás que entra através da renovação do ar e subtraindo a quantidade que sai através da renovação do, traduzida pela expressão (2):

$$V \cdot \frac{dc}{dt} = G + Q \cdot c_e - Q \cdot c \quad (2)$$

Sendo,  $V$  = volume interior do espaço ( $m^3$ );  $Q$  = caudal de ar escoado ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  $c_e$  = concentração de gás traçador do exterior;  $c$  = concentração de gás traçador no interior (ppm) no instante  $t$ ;  $G$  = caudal de gás traçador introduzido no interior do espaço.

Esta expressão permite a determinação das taxas de renovação de ar através de três técnicas distintas na realização dos ensaios, em função do tipo de emissão e controlo do gás traçador. A técnica de ensaio descrita neste procedimento é a do decaimento, que consiste na injeção de gás traçador no interior do espaço de ensaio até determinada concentração, concluída a injeção são monitorizados e registados os valores de concentração de gás traçador presente no ar interior que são, tendencialmente, decrescentes ao longo do tempo de ensaio devido à renovação de ar.

Com base na expressão (2), considerando que após a injeção de gás traçador não existe qualquer fonte de gás com composição química igual ao do gás traçador no interior do espaço de ensaio ( $G=0$ ) nem a presença relevante desse gás na composição do ar renovado ( $c_e=0$ ) a formulação que determina a taxa de renovação horária da técnica utilizada é dada pela expressão (3).

$$c = c_0 \cdot e^{-n \cdot t} \quad (3)$$

Ou seja, a correlação das concentrações registadas (ppm) e do tempo (horas) permite definir o decaimento da concentração de gás traçador ao longo do ensaio, sendo a taxa de renovação horária de ar ( $n$ ), do espaço ensaiado, definida pela expoente da expressão da curva de tendência (tipo exponencial), Figura 1.

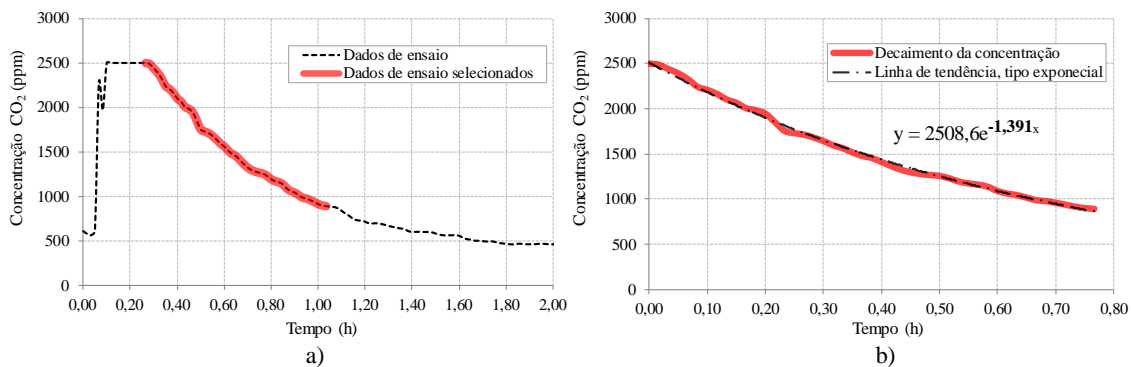


Figura 5 – Decaimento da concentração de gás traçador. a) Registo dos dados completos dados de ensaio e selecção dos dados para a determinação da taxa de renovação do ar. b) Determinação da taxa de renovação de ar horária.

No cálculo da taxa de renovação horária,  $n$ , devem ser seleccionados apenas os valores que confirmam uma curva de decaimento (Figura 2, à esquerda). Os valores com variação positiva (antes da curva de decaimento) correspondem ao período de injeção do gás, sendo o patamar de concentração constante o limite de leitura do analisador, após a curva de decaimento ocorre a estabilização da concentração natural desse gás no espaço de ensaio.

---

## PROCEDIMENTO – ENSAIO DE GÁS TRAÇADOR

---

Pág.: 5 de 5

### 2.6.1 Limites de confiança

A exactidão do valor da taxa de renovação do ar deve estar abaixo de 10% de incerteza. Os intervalos de confiança são estimados da seguinte forma:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (Y_i - \hat{Y})^2}{k - 2} \quad b) \quad (4)$$

$$E_n = \frac{s}{\sqrt{\sum_{i=1}^k (t_i - \bar{t})^2}} \quad c) \quad (5)$$

Sendo,  $k$  = número de amostras;  $Y$  = valor de  $\ln Ci$  (ppm);  $\hat{Y}$  = valor previsto de  $\ln Ci$  (ppm);  $t_i$  = tempo específico (h);  $\bar{t}$  = média dos intervalos de medida (h).

Os intervalos de confiança,  $F_n$ , de  $n$  para  $k$  amostras para a probabilidade de 95% ( $\alpha = 0,05$ ) são determinados através da distribuição *t-Student*, definida pela expressão (6):

$$Fn(t) = n \pm E_n \cdot t(k - 2; 1 - \alpha) \quad d) \quad (6)$$

Onde,  $n$  = taxa de renovação de ar medido (h-1);  $E_n$  = erro padrão de  $n$ ;  $t$  = valor determinado pela tabela de distribuição *t-Student* (-);  $(1-\alpha)$  = nível de confiança de  $n$  (-).

## 3. RELATÓRIO DE ENSAIO

Durante a execução dos ensaios deve ser preenchido o relatório de ensaio, permitindo registar todas as informações importantes e necessárias a futuras observações e interpretações dos dados de ensaio. O relatório de ensaio é composto pelo formulário preenchido, gráficos de pressurização e ou despressurização do espaço ensaiado e qualquer outro elemento relevante ao ensaio.



**ANEXO A.4 - RELATÓRIO – ENSAIO DE PRESSURIZAÇÃO**



**RELATÓRIO – ENSAIO DE PRESSURIZAÇÃO**

Pág.: 1 de 2

Processo nº

**1. OBJECTIVO**


---



---



---

**2. DESCRIÇÃO E CONDIÇÃO DAS ABERTURAS**


---



---



---

**3. EQUIPAMENTOS**

Porta ventiladora <i>BlowerDoor</i>	<input type="checkbox"/>	Computador portátil ( <i>software</i> TECTITE)	<input type="checkbox"/>
Ventilador e anéis	<input type="checkbox"/>	Gerador de fumos	<input type="checkbox"/>
APT	<input type="checkbox"/>	AIRFLOW TA460	<input type="checkbox"/>
Controlador de velocidade	<input type="checkbox"/>	HygroLog HL-NT data logger	<input type="checkbox"/>
Moldura ajustável	<input type="checkbox"/>	Outros:	<input type="checkbox"/>
Capa	<input type="checkbox"/>	_____	
3 tubos coloridos	<input type="checkbox"/>	_____	

**4. ENSAIO DE PRESSURIZAÇÃO**

Conformidade do ensaio	EN 13829:2002	<input type="checkbox"/>	Outro: _____
Método	Manual	<input type="checkbox"/>	Automático <input type="checkbox"/>
Pressões de ensaio:	EN 13829:2002	<input type="checkbox"/>	Outro: _____

Comentários:

Data e Hora:	
Pressão barométrica (Pa):	
Temperatura exterior (°C):	
Temperatura interior (°C):	
Anel:	
Baseline pré-ensaio (Pa):	
Baseline pós-ensaio (Pa):	
<b>Resultados</b>	
Coeficiente C:	
Expoente n:	
Coef. correlação:	
Q <sub>50</sub> [m <sup>3</sup> /h]:	
n <sub>50</sub> [h <sup>-1</sup> ]:	
w <sub>50</sub> [m <sup>3</sup> /(h.m <sup>2</sup> ):	
q <sub>50</sub> [m <sup>3</sup> /(h.m <sup>2</sup> ):	
Ficheiro de registo (.bld):	

## PROCEDIMENTO – ENSAIO DE PRESSURIZAÇÃO

Pág.: 2 de 2

### 5. ENSAIO DE DESPRESSURIZAÇÃO

Conformidade do ensaio      EN 13829:2000            Outro: \_\_\_\_\_  
 Método                              Manual                                    Automático                        
 Pressões de ensaio:              EN 13829:2000            Outro: \_\_\_\_\_

Comentários:

Data e Hora:	
Pressão barométrica (Pa):	
Temperatura exterior (°C):	
Temperatura interior (°C):	
Anel:	
Baseline pré-ensaio (Pa):	
Baseline pós-ensaio (Pa):	

#### Resultados

Coefficiente C:	
Expoente n:	
Coef. correlação:	
Q <sub>50</sub> [m <sup>3</sup> /h]:	
n <sub>50</sub> [h <sup>-1</sup> ]:	
w <sub>50</sub> [m <sup>3</sup> /(h.m <sup>2</sup> )]:	
q <sub>50</sub> [m <sup>3</sup> /(h.m <sup>2</sup> )]:	
Ficheiro de registo (.bld):	

### 6. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DAS FRINCHAS (Gerador de fumos)

---



---



---



---



---



---

### 7. ELEMENTOS ANEXOS

Gráficos do ensaio de pressurização        
 Gráficos do ensaio de despressurização        
 Outros: \_\_\_\_\_

---

**ANEXO A.5 - RELATÓRIO – ENSAIO DE GÁS TRAÇADOR**



## RELATÓRIO – ENSAIO DE GÁS TRAÇADOR

Pág.: 1 de 1

Processo n°

### 1. OBJECTIVO

---

---

---

### 2. DESCRIÇÃO E CONDIÇÃO DAS ABERTURAS

---

---

---

---

### 3. EQUIPAMENTOS

- Analizador de concentração de gás traçador Telaire 7001
- Logger de concentrações de gás traçador HOBO U12
- Computador portátil (software *HOBOWare*)
- Logger de temperatura HygroLog HL-NT
- Botija de gás traçador
- Outros: \_\_\_\_\_

### 4. ENSAIO DE GÁS TRAÇADOR

Conformidade do ensaio EN 12569:2000 Outro: \_\_\_\_\_

Método Decaimento Outro: \_\_\_\_\_

Tipo de gás traçador CO<sub>2</sub> Outro: \_\_\_\_\_

Comentários:

Data e hora:	
Velocidade do vento [m/s]:	
Direcção do vento:	
Temperatura exterior [°C]:	
Temperatura interior [°C]:	
Concentração inicial [ppm]:	

#### Resultados

Data e hora:	
Concentração final [ppm]:	
Ficheiro de registo (.hobo):	
Taxa de renovação do ar [h <sup>-1</sup> ]	

### 5. ELEMENTOS ANEXOS

- Gráfico de decaimento da concentração do gás traçador
- Outros: \_\_\_\_\_



## ANEXO B – CALIBRAÇÃO DE SONDAS DE PRESSÃO

A calibração das células de pressão foi efectuada numa câmara de ensaios de permeabilidade ao ar de caixilharias no LNEC, no Departamento de Edifícios, numa gama de pressões entre -100 Pa e 100 Pa. A câmara de ensaios permite a medição do caudal de ar que atravessa as juntas da caixilharia em função da diferença de pressão entre os dois lados da janela (interior e exterior).

A célula de pressão é composta por dois terminais, sendo a diferença de pressão entre estes traduzida num determinado valor de tensão eléctrica (*volts*). Um dos terminais da célula tem ligação directa com o interior da câmara e o outro no exterior. O registo dos valores de tensão eléctrica é efectuado num *logger*.

Neste sentido, pretende-se com a calibração determinar para vários valores de diferencial de pressão os respectivos valores de tensão transmitido pela célula e assim definir uma equação que permita a conversão da tensão (*volts*) para pressão (Pa).

A calibração foi composta por 4 valores de diferencial de pressão e o respectivo registo, segundo a segunda, dos valores de tensão eléctrica. No Quadro B.1 são apresentados os valores médios registados de tensão eléctrica e o diferencial de pressão, base para as curvas de calibração (Figura B.1).

No ANEXO B.1 encontram-se os dados completos das duas células de pressão.

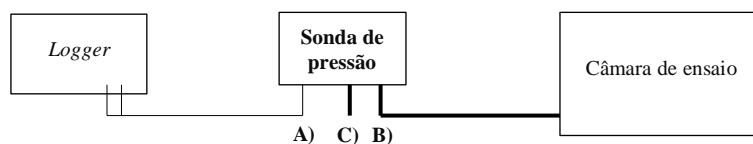


Figura B.1 - Esquema dos equipamentos utilizados na calibração da sonda de pressão.



Figura B.2 – Células de pressão. A) Ligação ao *logger*, transmissão da tensão eléctrica gerada pela sonda. B) Terminal com ligação ao interior da câmara. C) Terminal com ligação ao exterior da câmara (referência).



Figura B.3 – Calibração das células de pressão. a) Câmara de ensaios de permeabilidade ao ar de caixilharia, LNEC. b) Ligação de um terminal da célula de pressão ao interior da câmara.

Quadro B.1 - Síntese dos resultados obtidos na calibração das células de pressão.

Teste Sonda P-01 (Fachada NO)		Teste Sonda P-02 (Fachada SE)	
Tensão (V)	Pressão (Pa)	Tensão (V)	Pressão (Pa)
2,51074	0,0	2,49834	0,0
0,60846	-98,5	0,52592	-98,5
1,55004	-48,0	1,51888	-48,0
3,45680	46,9	3,44179	46,9
4,45483	96,0	4,43307	96,0

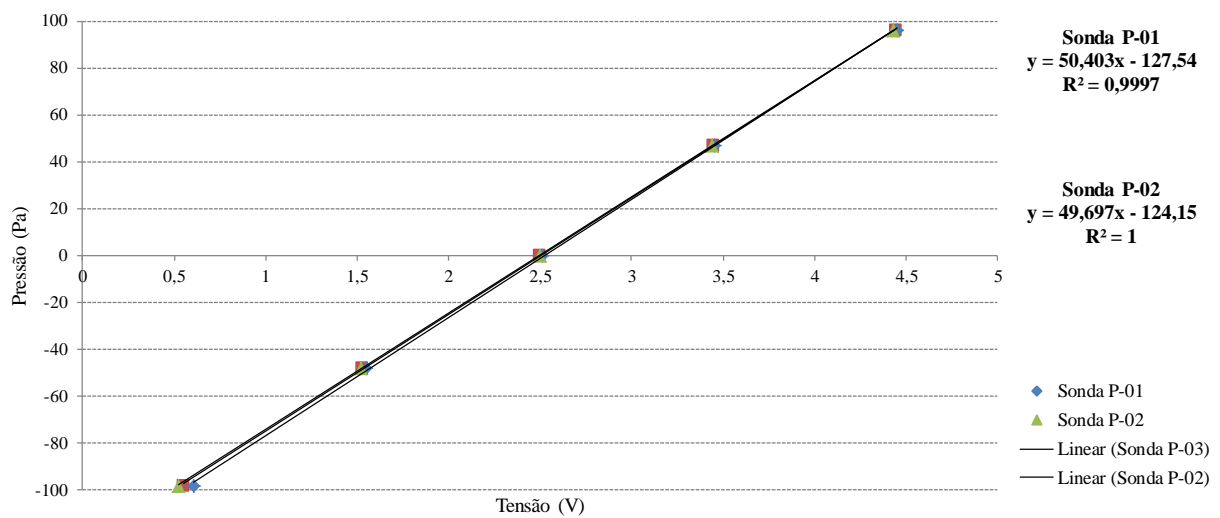


Figura B.4 - Curva de calibração e determinação das respectivas equações.

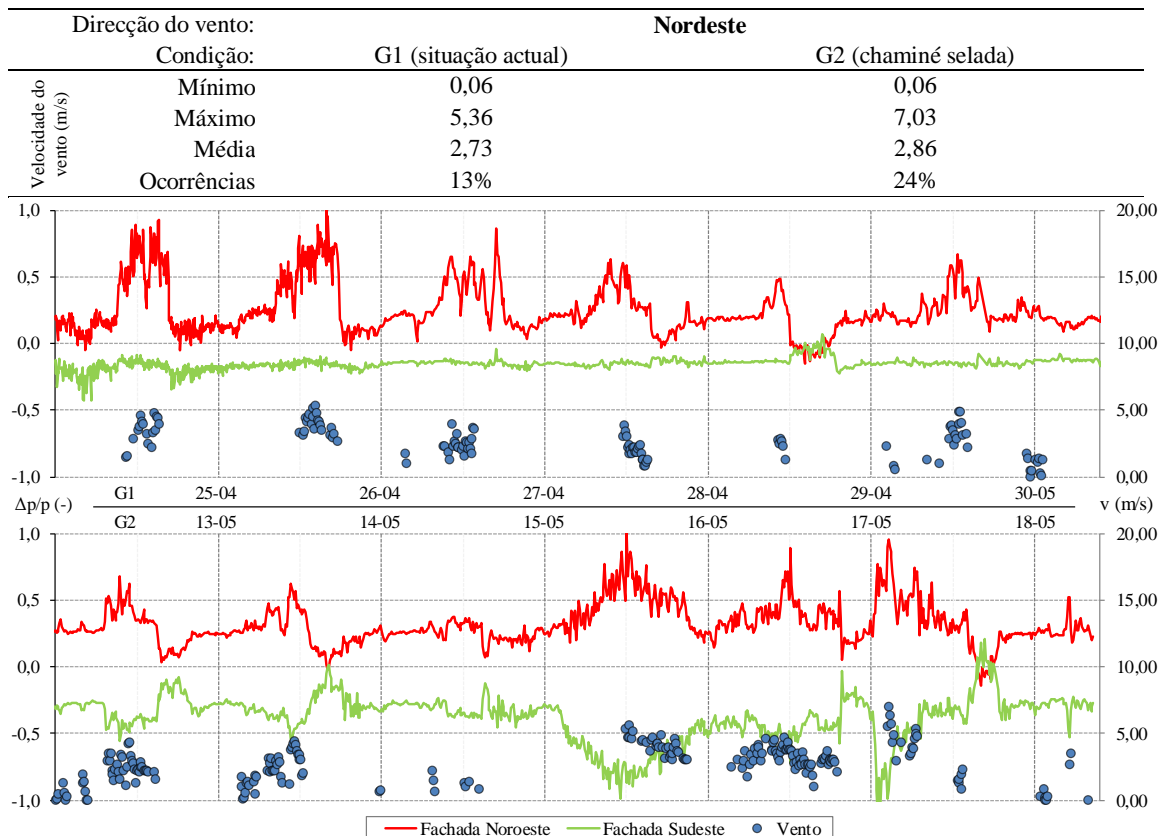
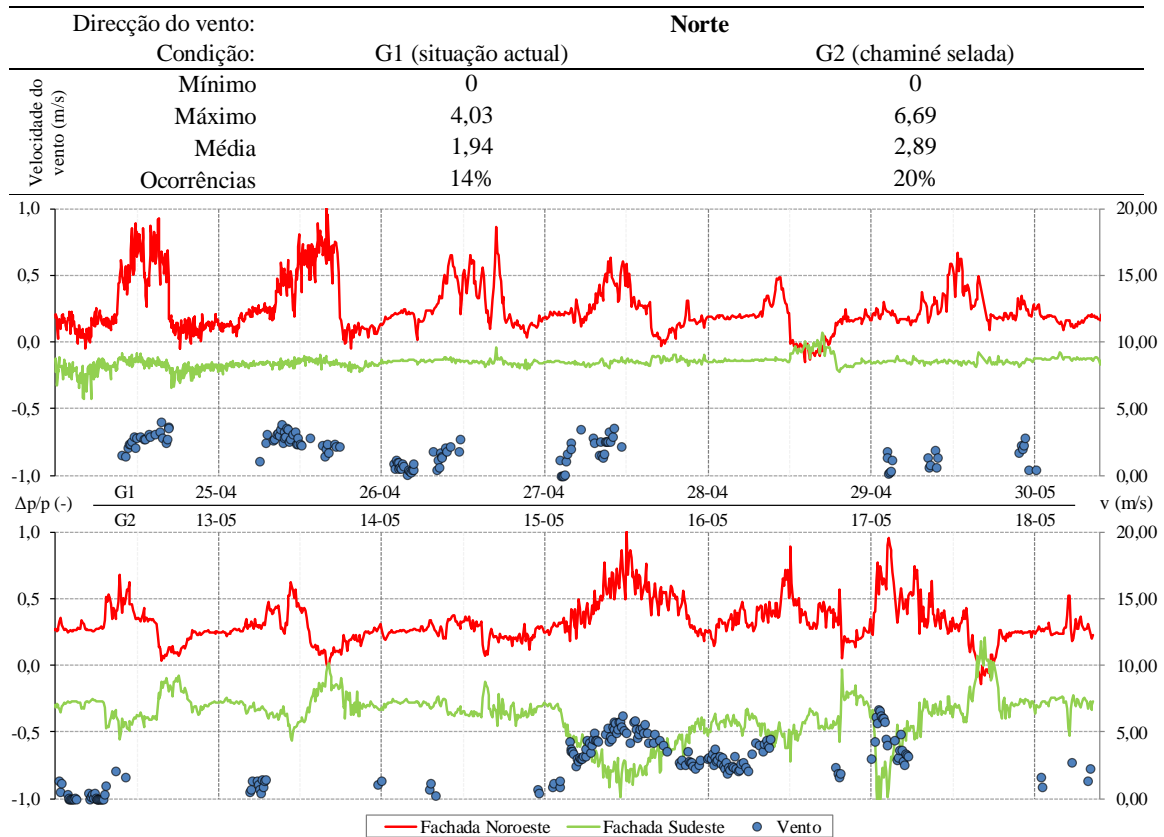
## ANEXO B.1 – DADOS DE CALIBRAÇÃO

<i>Teste Sonda P-01</i>		<i>Teste Sonda P-01</i>	
<i>Tensão (V)</i>	<i>Pressão (Pa)</i>	<i>Tensão (V)</i>	<i>Pressão (Pa)</i>
2,979	2,979	2,914	20,134
2,791	2,791	2,736	11,258
2,862	2,862	2,849	16,882
2,730	2,730	2,685	8,715
2,865	2,865	2,808	14,880
2,825	2,825	2,797	14,296
2,805	2,805	2,797	14,319
2,816	2,816	2,770	12,964
2,944	2,944	2,899	19,413
2,790	2,790	2,772	13,070
2,910	2,910	2,844	16,653
2,792	2,792	2,791	13,996
2,841	2,841	2,785	13,691
2,903	2,903	2,887	18,817
2,714	2,714	2,705	9,704
2,931	2,931	2,889	18,893
2,719	2,719	2,699	9,427
2,954	2,954	2,888	18,851
2,804	2,804	2,810	14,976
2,817	2,817	2,770	12,973
2,911	2,911	2,895	19,196
2,877	2,877	2,827	15,806
2,857	2,857	2,832	16,052
2,757	2,757	2,706	9,766
2,999	2,999	2,981	23,498
2,740	2,740	2,735	11,231
2,856	2,856	2,795	14,228
2,503	2,503	2,469	-2,077
2,506	2,506	2,470	-2,003
2,504	2,504	2,470	-2,026
2,503	2,503	2,471	-1,967
2,499	2,499	2,467	-2,184
2,503	2,503	2,471	-1,973
2,504	2,504	2,471	-1,940
2,510	2,510	2,476	-1,709
2,508	2,508	2,471	-1,981
2,507	2,507	2,475	-1,787
2,509	2,509	2,476	-1,723
2,506	2,506	2,472	-1,918
2,508	2,508	2,474	-1,813
2,508	2,508	2,478	-1,624
2,509	2,509	2,475	-1,780
2,509	2,509	2,476	-1,724
2,512	2,512	2,482	-1,430
2,499	2,499	2,466	-2,226
2,511	2,511	2,479	-1,545
2,513	2,513	2,483	-1,360
2,508	2,508	2,474	-1,788
2,514	2,514	2,481	-1,468
2,508	2,508	2,477	-1,642
2,516	2,516	2,481	-1,449
2,511	2,511	2,472	-1,891
2,510	2,510	2,478	-1,593
2,514	2,514	2,482	-1,438
2,507	2,507	2,478	-1,618
2,508	2,508	2,476	-1,727
2,507	2,507	2,473	-1,876
2,511	2,511	2,480	-1,501
2,515	2,515	2,482	-1,396
2,513	2,513	2,479	-1,577
2,508	2,508	2,477	-1,663
2,503	2,503	2,470	-2,029
2,519	2,519	2,485	-1,274
2,513	2,513	2,478	-1,628

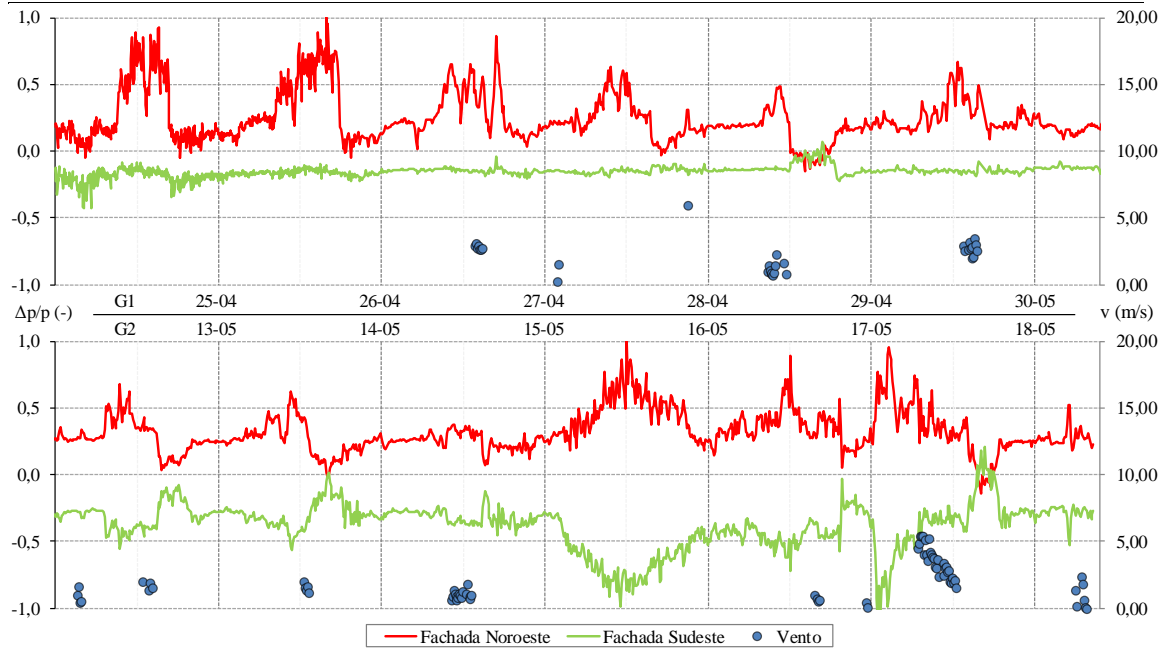


## ANEXO C – ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE $\Delta p/p$ EM FUNÇÃO DO VENTO

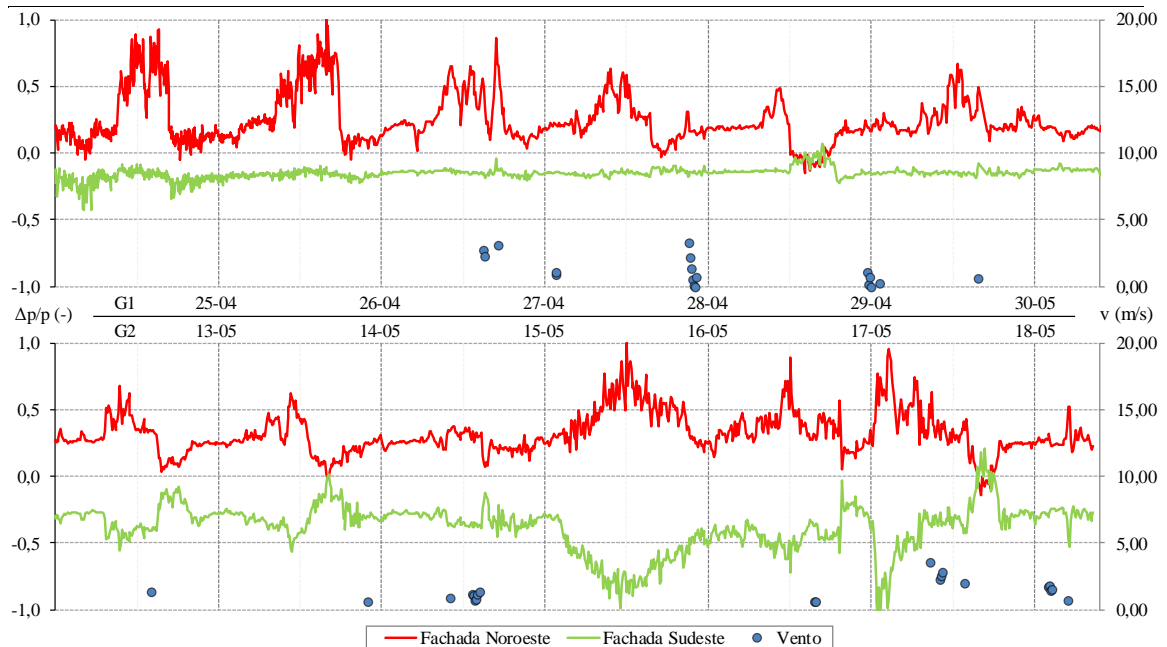
Neste Anexo é apresentada e analisada a variação de  $\Delta p/p$ , junto às fachadas NO e SE, e valores de velocidade do vento para cada principal direcção do vento (registados numa estação meteorológica próxima, Cais-do-Sodré).



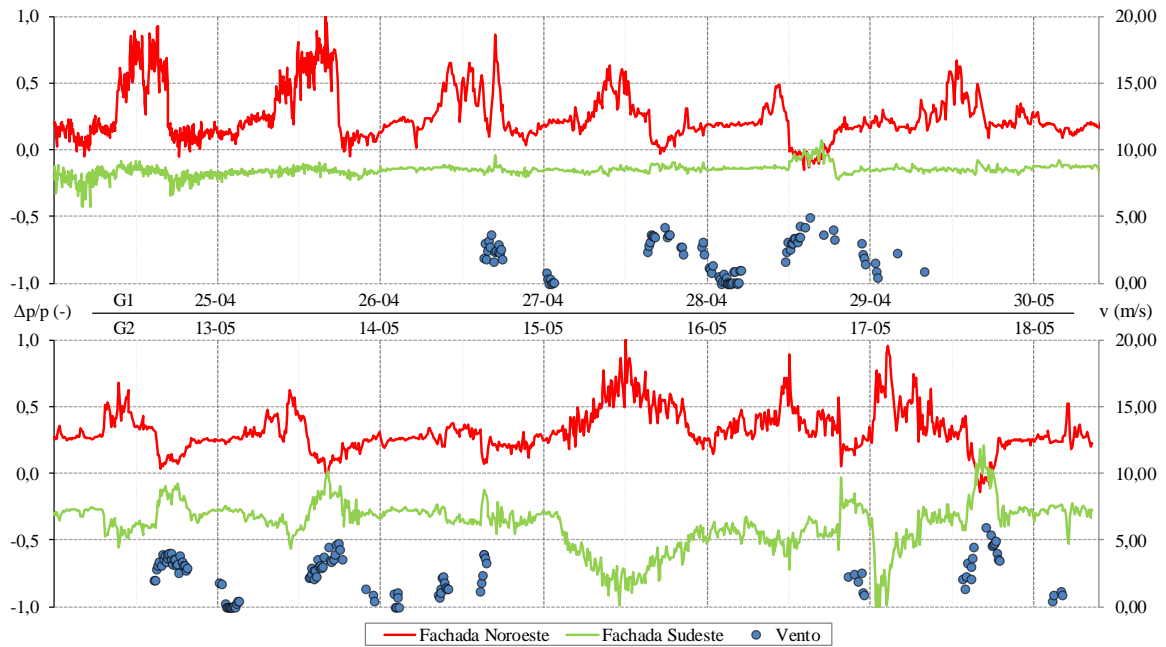
Direcção do vento:		<b>Este</b>	
Condição:		G1 (situação actual)	G2 (chaminé selada)
Velocidade do vento (m/s)	Mínimo	0,22	0
	Máximo	5,94	5,44
	Média	2,19	2,05
	Ocorrências	3%	8%



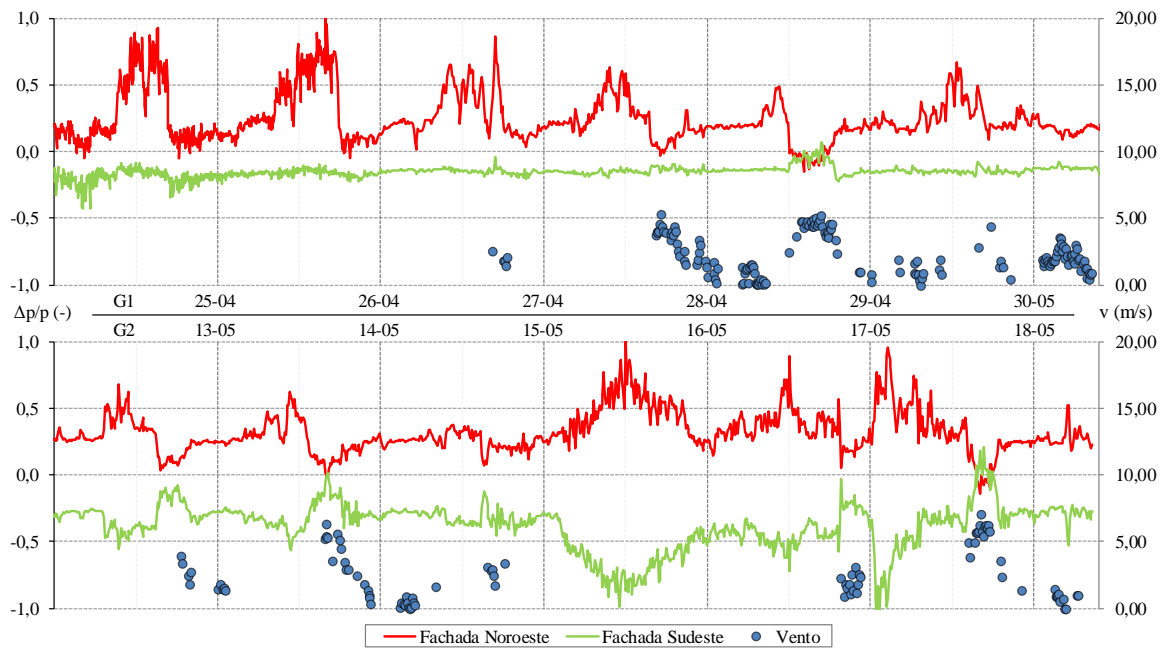
Direcção do vento:		<b>Sudeste</b>	
Condição:		G1 (situação actual)	G2 (chaminé selada)
Velocidade do vento (m/s)	Mínimo	0	0,64
	Máximo	3,31	3,58
	Média	1,15	1,46
	Ocorrências	2%	2%



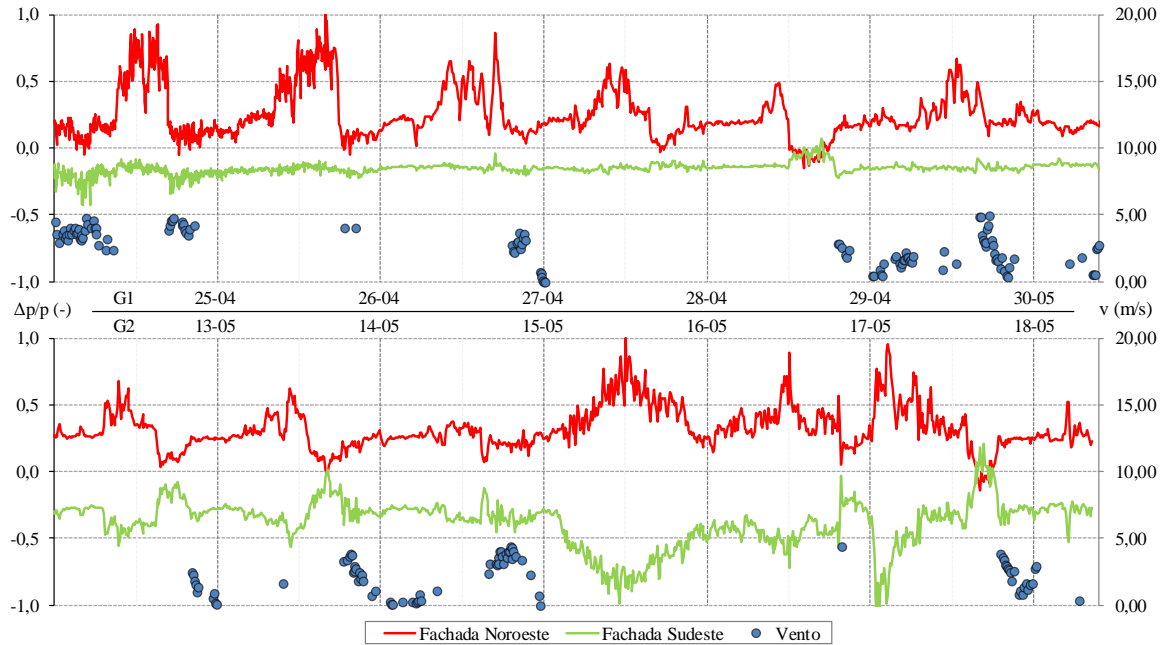
Direcção do vento:		Sul	
Condição:		G1 (situação actual)	G2 (chaminé selada)
Velocidade do vento (m/s)	Mínimo	0	0
	Máximo	4,92	5,94
	Média	1,95	2,45
	Ocorrências	10%	13%



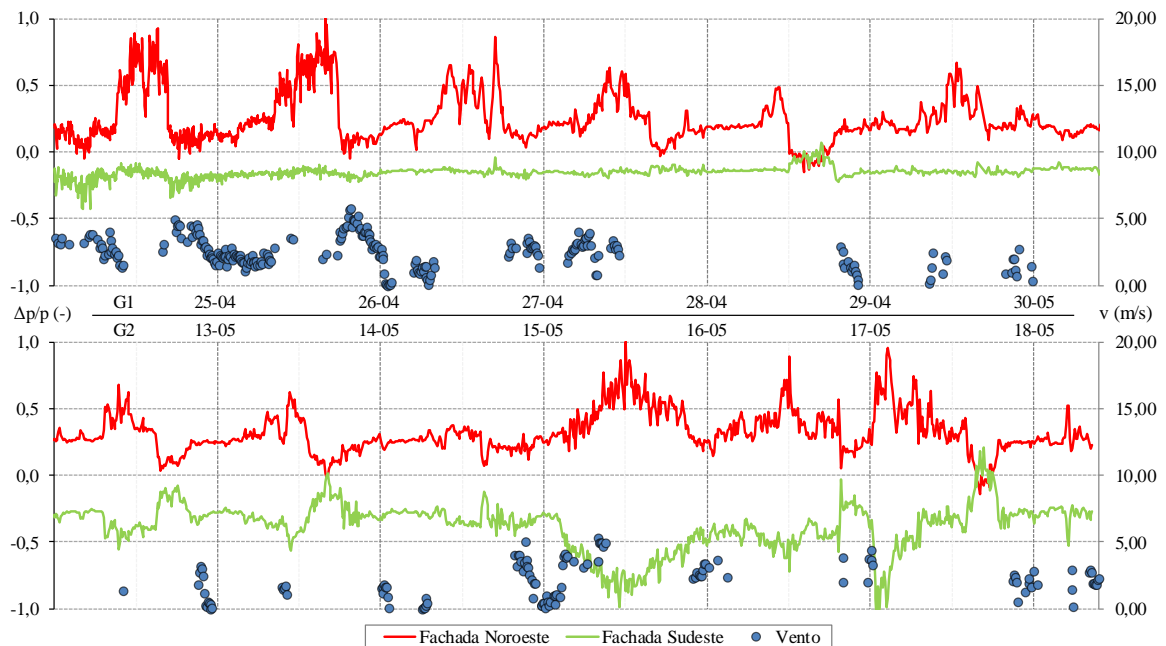
Direcção do vento:		Sudoeste	
Condição:		G1 (situação actual)	G2 (chaminé selada)
Velocidade do vento (m/s)	Mínimo	0	0
	Máximo	5,28	7,06
	Média	2,24	2,58
	Ocorrências	17%	9%



Direcção do vento:		Oeste	
Condição:		G1 (situação actual)	G2 (chaminé selada)
Velocidade do vento (m/s)	Mínimo	0	0
	Máximo	4,97	4,42
	Média	2,53	2,19
	Ocorrências	14%	9%



Direcção do vento:		Noroeste	
Condição:		G1 (situação actual)	G2 (chaminé selada)
Velocidade do vento (m/s)	Mínimo	0	0
	Máximo	5,81	5,31
	Média	2,48	2,17
	Ocorrências	27%	14%



Norte  
Nordeste

Dado o menor nível de protecção ao vento proporcionado pelos edifícios vizinhos, nomeadamente os edifícios a Norte e Nordeste de menor altura, permite a maior incidência do vento na fachada NO originando os valores máximos de  $\Delta p/p$  registados nestes períodos de monitorização. Devido ao ângulo formado com a fachada NO, a menor incidência dos ventos de Nordeste, traduz-se em valores de  $\Delta p/p$  ligeiramente inferiores aos máximos.

---

Este  
Sudeste

A fachada SE apresenta uma elevada protecção proporcionada pelos edifícios adjacentes para maioria das direcções do vento, gerando pressões essencialmente negativas em relação ao interior da habitação. Dada a baixa ocorrência de vento de Este e Sudeste, registado nestes períodos de monitorização, não é possível observar a sua influência nos valores de  $\Delta p/p$ , nem no comportamento da ventilação. No entanto, conclui-se que o vento segundo estas duas direcções ocorreu apenas, em média, 8% das situações registadas e 3% com valores acima da média ( $v \leq 2,7\text{m/s}$ ), conferindo o descrito na secção 3.3.3 em que ventos com esta direcção são principalmente de fraca intensidade, brisas provenientes do estuário do Rio Tejo.

---

Sul  
Sudoeste

Analisando os valores registados, os ventos de Sul e Sudoeste são responsáveis pela diminuição da pressão positiva na fachada NO e, também, diminuição da pressão negativa na fachada SE. Dada a elevada protecção da fachada SE, pode-se presumir que este fenómeno ocorre não pela incidência directa do vento nesta fachada, mas resultado da protecção e depressão gerada pelo edifício adjacente. Nos dias 28 de Abril e 17 de Maio registou-se, durante a tarde, a inversão no sentido da ventilação (de SE para NO) em consequência dos intensos ventos de Sul e Sudoeste registados nesses períodos.

---

Oeste  
Noroeste

Relacionando os períodos de maior intensidade de vento segundo as direcções Oeste e Noroeste, a fraca resposta das curvas de  $\Delta p/p$  pode-se concluir que a elevada protecção da fachada NO ao vento, proporcionada pelo edifício n.º 31, que acompanha grande parte da Rua Jardim do Tabaco, conduz à redução da intensidade do vento sobre a fachada, não se traduzindo no aumento de  $\Delta p$ .

---



## ANEXO D – LISTAGEM DE INPUTS E OUTPUT - CP GENERATOR

### ANEXO D.1 - INPUTS

Listagem do ficheiro de *input* da aplicação *Cp Generator*, descrevendo descrição dos principais parâmetros do edifício em estudo. Neste exemplo são solicitados os valores de Cp para as fachadas NO e SE (*facade 3 e 1*, respectivamente) do piso 2 e cobertura (*facade 5*).

---

```
{file=input}
+-----+
| title          |
+-----+
    title: Gaioleiro_P2
+-----+
| wind.Zo        |
+-----+
    Direction: 0  45  90  135  180  225  270  315
    Zo:          3  7  7  1  7  7  3  3
+-----+
| north arrow compass direction in plan |
+-----+
    Direction: 45
+-----+
| obstacles (position in m(=meter))|
+-----+
Ground level: 0.
Roof height : 18.0000
    Name : building
    x,y : 25.  32.
    Azimut : 180.
L,W,H,#,à,w: 10.0000 13.0000 18.0000 1  30  13.0
    Name: meteo
    x,y: 1.0E6  -5.0
    Azimut: 90.
    L,W,H: 0.1  0.1  10.0
    Name: obstacle 1
    x,y: 10.  0.
    Azimut: 180.
    L,W,H: 10.0000 45.0000 25.0000
    Name: obstacle 2
    x,y: 36.00000 22.0000
    Azimut: 180.0000
    L,W,H: 15.0000 23.0000 25.0000
    Name: obstacle 3
    x,y: 0.00000 60.0000
    Azimut: 180.0000
    L,W,H: 50.0000 20.0000 25.0000
+-----+
| cp-positions   |
+-----+
    unit: m
Building side: facade 1
    Pos. x,y : 5.0000  8.5000
Building side: facade 4
    Pos. x,y : 5.0000  8.5000
Building side: facade 3
    Pos. x,y : 5.0000  8.5000
Building side: facade 2
    Pos. x,y : 5.0000  8.5000
Building side: roof
    Pos. x,y : 9.0000  6.5000
```

---



## ANEXO D.2 - OUTPUTS

Listagem do ficheiro de *output* da aplicação “*Cp Generator*”, descrevendo, neste exemplo, os valores de  $C_p$  nas fachadas do piso 2 e cobertura em função do direcção do vento.

Programme CPgen 1.1.0 2005 Apr 06

Input file:

Title: Gaioleiro

Changed:2011-08-15 14:46:34

Remarks: none

-----  
The table contains the  $C_p$ -values and corrections for obstacles and roughness. The columns are: wind direction, corrected  $C_p$ .

facade 1	260	-0.204	155	-0.353	50	-0.562	315	-0.395	210	-0.155	105	-0.117	
0	-0.162	265	-0.193	160	-0.299	55	-0.350	320	-0.364	215	-0.155	110	-0.139
5	-0.157	270	-0.220	165	-0.252	60	-0.299	325	-0.318	220	-0.157	115	-0.177
10	-0.163	275	-0.245	170	-0.187	65	-0.291	330	-0.258	225	-0.159	120	-0.266
15	-0.177	280	-0.225	175	-0.142	70	-0.255	335	-0.188	230	-0.163	125	-0.364
20	-0.195	285	-0.198	180	-0.167	75	-0.218	340	-0.113	235	-0.166	130	-0.401
25	-0.216	290	-0.187	185	-0.204	80	-0.184	345	-0.036	240	-0.162	135	-0.493
30	-0.232	295	-0.189	190	-0.205	85	-0.153	350	0.045	245	-0.155	140	-0.808
35	-0.247	300	-0.212	195	-0.197	90	-0.129	355	0.105	250	-0.149	145	-1.115
40	-0.278	305	-0.241	200	-0.190	95	-0.112			255	-0.137	150	-1.190
45	-0.269	310	-0.259	205	-0.180	100	-0.104	facade 2	260	-0.097	155	-1.180	
50	-0.129	315	-0.270	210	-0.165	105	-0.102	0	-0.179	265	-0.069	160	-1.171
55	0.021	320	-0.272	215	-0.144	110	-0.106	5	-0.169	270	-0.102	165	-1.130
60	0.064	325	-0.268	220	-0.114	115	-0.113	10	-0.164	275	-0.149	170	-1.074
65	0.077	330	-0.258	225	-0.078	120	-0.118	15	-0.164	280	-0.173	175	-0.936
70	0.104	335	-0.245	230	-0.033	125	-0.123	20	-0.167	285	-0.198	180	-0.577
75	0.127	340	-0.234	235	0.015	130	-0.120	25	-0.172	290	-0.239	185	-0.234
80	0.143	345	-0.220	240	0.063	135	-0.135	30	-0.176	295	-0.280	190	-0.159
85	0.154	350	-0.197	245	0.108	140	-0.210	35	-0.179	300	-0.313	195	-0.172
90	0.154	355	-0.175	250	0.146	145	-0.282	40	-0.168	305	-0.339	200	-0.170
95	0.161			255	0.176	150	-0.282	45	-0.174	310	-0.358	205	-0.177
100	0.198	facade 4	260	0.189	155	-0.263	50	-0.244	315	-0.360	210	-0.179	
105	0.242	0	-0.207	265	0.201	160	-0.259	55	-0.311	320	-0.316	215	-0.191
110	0.281	5	-0.232	270	0.237	165	-0.263	60	-0.308	325	-0.270	220	-0.229
115	0.313	10	-0.248	275	0.259	170	-0.295	65	-0.284	330	-0.266	225	-0.277
120	0.331	15	-0.261	280	0.229	175	-0.308	70	-0.270	335	-0.270	230	-0.333
125	0.339	20	-0.274	285	0.176	180	-0.239	75	-0.258	340	-0.258	235	-0.376
130	0.320	25	-0.283	290	0.116	185	-0.171	80	-0.250	345	-0.239	240	-0.378
135	0.332	30	-0.290	295	0.053	190	-0.189	85	-0.245	350	-0.217	245	-0.357
140	0.469	35	-0.292	300	-0.004	195	-0.233	90	-0.245	355	-0.195	250	-0.328
145	0.598	40	-0.287	305	-0.060	200	-0.258	95	-0.248			255	-0.286
150	0.580	45	-0.268	310	-0.119	205	-0.299	100	-0.254	facade 5	260	-0.213	
155	0.521	50	-0.213	315	-0.163	210	-0.383	105	-0.260	0	-0.549	265	-0.164
160	0.487	55	-0.161	320	-0.165	215	-0.479	110	-0.262	5	-0.454	270	-0.218
165	0.451	60	-0.155	325	-0.154	220	-0.582	115	-0.267	10	-0.416	275	-0.288
170	0.410	65	-0.162	330	-0.153	225	-0.648	120	-0.273	15	-0.400	280	-0.294
175	0.350	70	-0.163	335	-0.154	230	-0.622	125	-0.299	20	-0.398	285	-0.293
180	0.237	75	-0.165	340	-0.154	235	-0.545	130	-0.352	25	-0.402	290	-0.314
185	0.124	80	-0.169	345	-0.157	240	-0.440	135	-0.474	30	-0.403	295	-0.356
190	0.068	85	-0.176	350	-0.167	245	-0.318	140	-0.776	35	-0.403	300	-0.442
195	0.027	90	-0.185	355	-0.182	250	-0.190	145	-1.053	40	-0.423	305	-0.537
200	-0.027	95	-0.202			255	-0.090	150	-1.084	45	-0.394	310	-0.618
205	-0.083	100	-0.237	facade 3	260	-0.076	155	-1.021	50	-0.197	315	-0.670	
210	-0.135	105	-0.280	0	0.121	265	-0.098	160	-0.946	55	-0.000	320	-0.663
215	-0.186	110	-0.326	5	0.085	270	-0.122	165	-0.847	60	0.027	325	-0.616
220	-0.238	115	-0.367	10	-0.035	275	-0.157	170	-0.750	65	0.005	330	-0.511
225	-0.277	120	-0.393	15	-0.198	280	-0.206	175	-0.623	70	0.004	335	-0.436
230	-0.283	125	-0.406	20	-0.385	285	-0.258	180	-0.411	75	-0.000	340	-0.511
235	-0.276	130	-0.393	25	-0.565	290	-0.307	185	-0.220	80	-0.008	345	-0.612
240	-0.269	135	-0.393	30	-0.706	295	-0.350	190	-0.168	85	-0.019	350	-0.645
245	-0.259	140	-0.468	35	-0.797	300	-0.383	195	-0.165	90	-0.036	355	-0.634
250	-0.243	145	-0.523	40	-0.824	305	-0.403	200	-0.157	95	-0.057		
255	-0.226	150	-0.453	45	-0.769	310	-0.407	205	-0.156	100	-0.086		



## ANEXO E – LIMITES DE CONFIANÇA – ENSAIOS DE GASES TRAÇADORES

Apresenta-se neste Anexo o cálculo dos limites de confiança dos resultados obtidos experimentalmente nos ensaios de gás traçador, Subcapítulo 5.2.

Ensaio	G1		G2		G3	
	NO	SE	NO	SE	NO	SE
Fachada						
<i>n</i>	1,39	1,36	1,31	0,79	0,21	0,21
<i>k</i>	47	47	55	69	347	319
$\sum_{i=1}^k (Y_i - \hat{Y}_i)^2$	0,01289	0,06020	0,28844	0,09429	3,43863	0,20409
$s^2$	0,00029	0,00134	0,00544	0,00141	0,00997	0,00064
<i>s</i>	0,01692	0,03658	0,07377	0,03751	0,09984	0,02537
$\bar{t}$			0,01667			
$\sqrt{\sum_{i=1}^k (t_i - \bar{t})^2}$	2,95311	2,95311	3,76530	5,33620	61,79591	54,43813
$E_n$	0,00573	0,01239	0,01959	0,00703	0,00162	0,00047
$t(k-2, 1-\alpha)$	1,67943	1,67943	1,67412	1,66792	1,64928	1,64967
$\pm$	0,00962	0,02080	0,03280	0,01173	0,00266	0,00077
$\pm$ (%)	0,69	1,53	2,50	1,48	1,25	0,37
$n_{máx}$	1,40	1,38	1,34	0,80	0,22	0,21
$n_{mín}$	1,38	1,34	1,28	0,78	0,21	0,21



**ANEXO F - ESTUDO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO  
DE UMA HABITAÇÃO EM EDIFÍCIO MULTIFAMILIAR**



**FICHA DE IDENTIFICAÇÃO**

Pág.: 1 de 3

Processo nº 01

**1. INFORMAÇÃO DO CLIENTE**
**OBSERVAÇÕES**

Nome: [REDACTED]	
Morada: [REDACTED]	
Contacto: [REDACTED]	

**2. INFORMAÇÃO DO TÉCNICO**

Nome: [REDACTED]	
Contacto: [REDACTED]	
A realizar: Ensaio de pressurização para a caracterização da permeabilidade ao ar de componentes da envolvente e estudo do impacto no sistema de ventilação da habitação de medidas de melhoria normalmente implementadas através de um modelo numérico (substituição da caixilharia exterior, melhoria da permeabilidade ao ar das caixas de estore e instalação de exaustor).	

**3. INFORMAÇÃO DA HABITAÇÃO**

Morada: [REDACTED]	Latitude: [REDACTED] Longitude: [REDACTED]
Data de construção: 1992	Edifício multifamiliar, duas fracções por piso.
Tipologia: Apartamento T2	
Estado de conservação: Bom estado	
Tipo de aquecimento, ventilação e AC: Não existe	

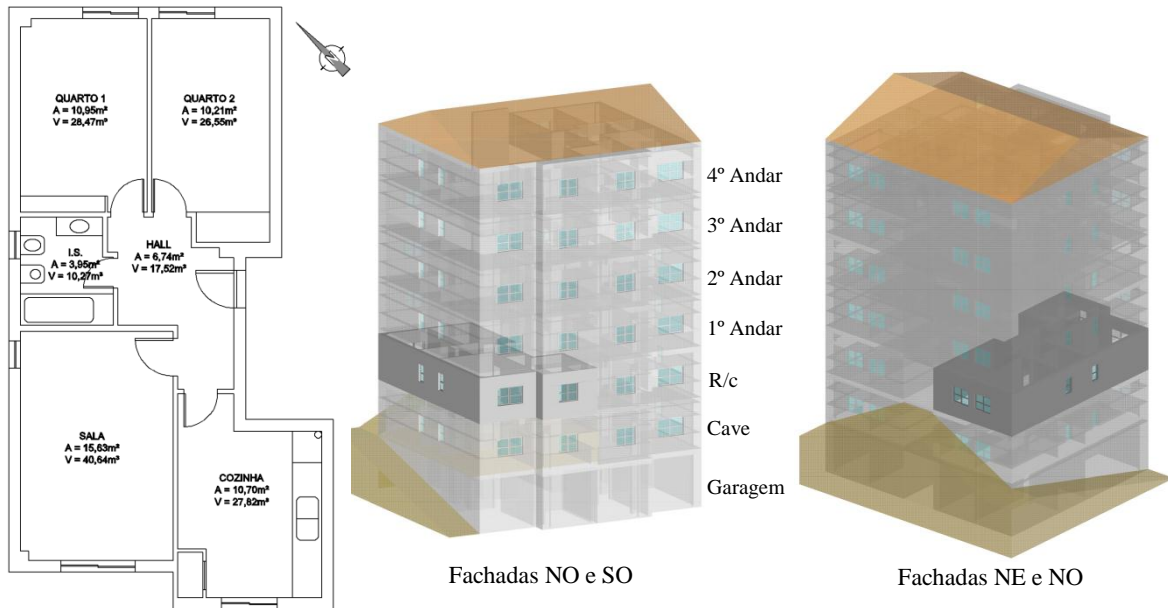
**4. CARACTERIZAÇÃO DA HABITAÇÃO**

Pavimento (m <sup>2</sup> ): 58,18	Todas as janelas são de correr com duas folhas móveis, excepção para as janelas na fachada NO sendo: janela basculante na instalação sanitária e janela de abrir de uma folha na sala. Caixilharia em alumínio e vidro comum Sistema de estore de rolo com caixa em madeira e régua em PVC.
Pé-direito (m): 2,60	
Volume (m <sup>3</sup> ): 151,27	
Área da envolvente (m <sup>2</sup> ): 72,25	
Área de vãos envidraçados (m <sup>2</sup> ): 7,77	
Exposição ao vento: Protegido (NO, N, NE, E) Desprotegido (SE, S, SO, O)	

**4.1 LOCALIZAÇÃO DO EDIFÍCIO**


Figura 1 - Perspectiva e localização do edifício estudado.

4.2 PLANTA DA HABITAÇÃO E PERSPECTIVAS DO EDIFÍCIO



4.3 PORMENORES DAS PRINCIPAIS COMPONENTES DA ENVOLVENTE



Figura 2 – Fotografias dos principais componentes da envolvente. a) Caixa de estore e janela de correr com caixilharia em alumínio e vidro comum. b) Abertura da chaminé do fogão. c) Abertura da conduta de exaustão da chaminé. d) Janela basculante em alumínio e vidro comum (instalação sanitária). e) Janela de abrir de uma folha em alumínio e vidro comum (sala – fachada NO). f) Pormenor da abertura da caixa de estore no exterior.

4.4 COMPORTAMENTO DO VENTO

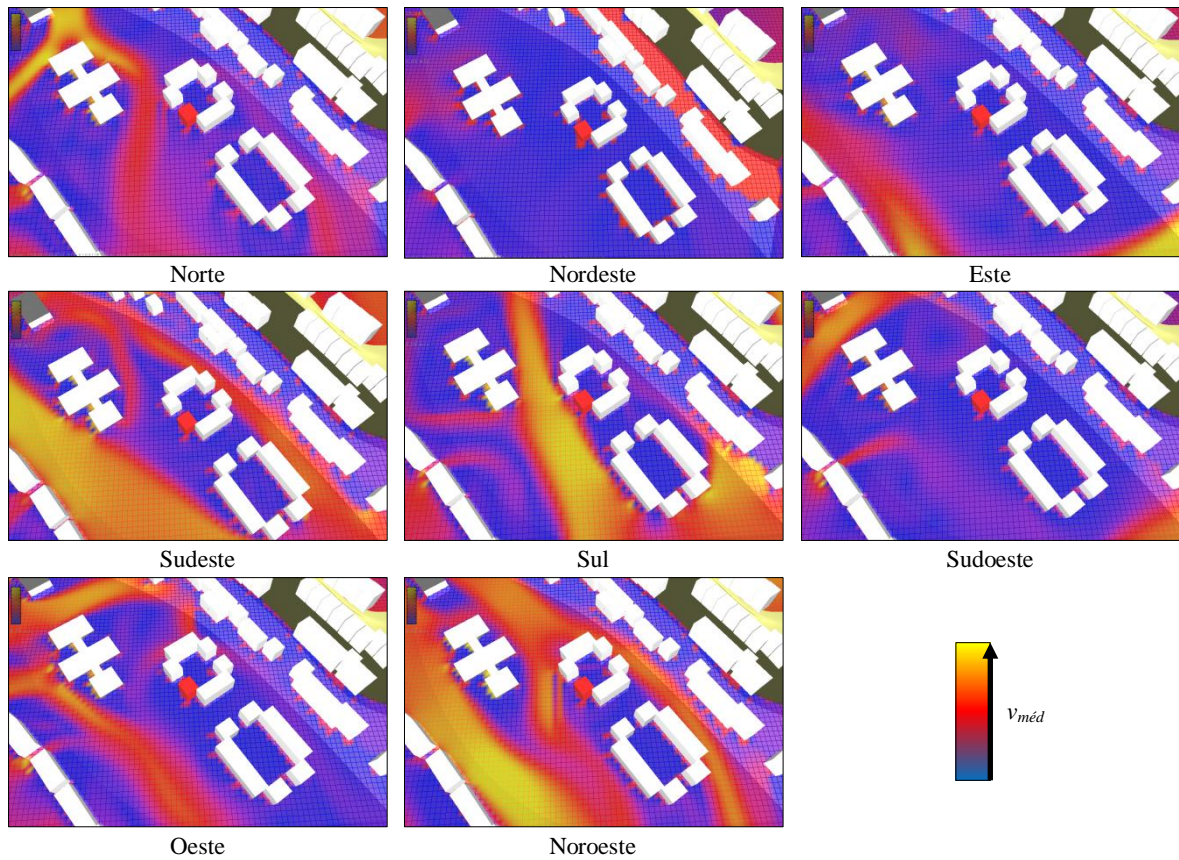


Figura 3 – Modelação e simulação em túnel de vento dos edifícios e topografia envolvente (*Ecotect Wind Tunnel Analysis*).  
Comportamento e velocidade do vento sobre a habitação em estudo edifício segundo várias direcções do vento.



## RELATÓRIO – ENSAIO DE PRESSURIZAÇÃO

Processo nº 01

### 1. OBJECTIVO

Caracterização da permeabilidade ao ar da envolvente de uma habitação em edifício multifamiliar, através de ensaios de pressurização e despressurização. Pretende-se através dos resultados dos ensaios a determinação dos coeficientes característicos ( $C$  e  $n$ ) da permeabilidade das janelas, fachada e perda de carga da chaminé, recorrendo a diferentes situações de ensaio.

### 2. DESCRIÇÃO E CONDIÇÃO DAS ABERTURAS

A habitação encontra-se ocupada, em boas condições e não tem qualquer sistema mecânico, neste sentido não é necessário qualquer trabalho de selagem na envolvente.

Na caracterização da permeabilidade ao ar das componentes e chaminé foram realizados diversos ensaios sob diferentes condições:

- Ensaio S1, todas as aberturas na envolvente encontram-se nas condições normais e habituais de utilização e ocupação, ou seja, janelas fechadas e chaminé desobstruída;
- Ensaio S2, a conduta da chaminé foi selada, sendo as restantes condições igual a S1, e;
- Ensaio S3, igual a S2, tendo sido vedadas as frinchas e juntas das caixilharias.

### 3. EQUIPAMENTOS

Porta ventiladora <i>BlowerDoor</i>		Computador portátil ( <i>software</i> TECTITE)	✓
Ventilador e anéis	✓	HygroLog HL-NT data logger	✓
APT	✓	Outros:	
Controlador de velocidade	✓	_____	
Moldura ajustável	✓	_____	
Capa	✓	_____	
3 tubos coloridos	✓	_____	

### 4. PRESSURIZAÇÃO

Conformidade do ensaio	EN 13829:2000	✓	Outro: _____
Método	Manual	<input type="checkbox"/>	Automático ✓
Pressões de ensaio:	EN 13829:2000	✓	Outro: _____

Comentários:  
Foram realizados 2 ensaios de pressurização para cada condição de ensaio, 6 no total.

Condição de ensaio	S1	S2	S3
Data e Hora:	10.04.2011 (16h)	10.04.2011 (18h)	10.04.2011 (20h)
Pressão barométrica (Pa):	10135 Pa	10135 Pa	10135 Pa
Temperatura exterior (°C):	17	16	14
Temperatura interior (°C):	21	21	21
Anel:	A e B	A e B	A e B
Baseline pré-ensaio (Pa):	-	-	-
Baseline pós-ensaio (Pa):	-	-	-
<b>Resultados</b>			
Coefficiente C:	48,10 / 49,45	25,30 / 37,65	15,20 / 16,35
Expoente n:	0,62 / 0,64	0,65 / 0,67	0,74 / 0,75
Coef. correlação:	0,99	0,99	0,98
Q <sub>50</sub> [m <sup>3</sup> /h]:	570	528	509
n <sub>50</sub> [h <sup>-1</sup> ]:	3,55	3,36	3,24
w <sub>50</sub> [m <sup>3</sup> /(h.m <sup>2</sup> )]:	9,37	8,87	8,57
q <sub>50</sub> [m <sup>3</sup> /(h.m <sup>2</sup> )]:	7,66	7,25	7,00
Ficheiro de registo (.bld):	Casa_P_01 a 02	Casa_P_03 a 04	Casa_P_05 a 06

Valores médios

**RELATÓRIO – ENSAIO DE PRESSURIZAÇÃO**

Pág.: 2 de 2

**5. DESPRESSURIZAÇÃO**

 Conformidade do ensaio EN 13829:2000  Outro: \_\_\_\_\_  
 Método Manual  Automático   
 Pressões de ensaio: EN 13829:2000  Outro: \_\_\_\_\_

 Comentários:  
 Foram realizados 2 ensaios de despressurização para cada condição de ensaio, 6 no total.

Condição de ensaio	S1	S2	S3
Data e Hora:	10.04.2011 16h	10.04.2011 17h	10.04.2011 18h
Pressão barométrica (Pa):	10135 Pa	10135 Pa	10135 Pa
Temperatura exterior (°C):	17	16	15
Temperatura interior (°C):	21	21	21
Anel:	A e B	A e B	A e B
Baseline pré-ensaio (Pa):	-	-	-
Baseline pós-ensaio (Pa):	-	-	-

**Resultados**

	S1	S2	S3
Coeficiente C:	49,45	37,65	16,35
Expoente n:	0,64	0,67	0,75
Coef. correlação:	0,97	0,98	0,98
Q <sub>50</sub> [m <sup>3</sup> /h]:	602	576	509
n <sub>50</sub> [h <sup>-1</sup> ]:	3,83	3,66	3,26
w <sub>50</sub> [m <sup>3</sup> /(h.m <sup>2</sup> ):	10,13	9,68	8,63
q <sub>50</sub> [m <sup>3</sup> /(h.m <sup>2</sup> ):	8,28	7,91	7,05
Ficheiro de registo (.bld):	Casa_D_01 a 02	Casa_D_03 a 04	Casa_D_05 a 06

Valores médios

**6. ELEMENTOS FOTOGRÁFICOS DOS ENSAIOS**

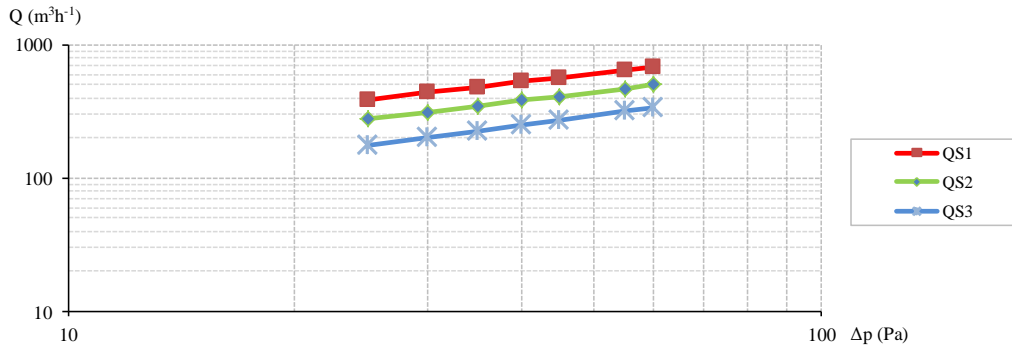

Figura 1 – Fotografias do equipamento de ensaio e situações de ensaio. a) Porta ventiladora instalada na porta de patamar (vista pelo interior). b) Porta ventiladora instalada na porta de patamar (vista pelo exterior). c) Janela da cozinha com as frinchas da caixilharia seladas com fita-cola. d) Pormenor da selagem das frinchas. e) Chaminé do fogão com a abertura selada. f) Caixa de estore em madeira

**7. ELEMENTOS ANEXOS**

 Gráficos do ensaio de pressurização 

Outros: Determinação dos coeficientes (C e n) de permeabilidade da fachada, da chaminé das janelas (e determinação da respectiva classe de permeabilidade ao ar de acordo com EN 12207:1999).

GRÁFICO DOS ENSAIOS DE PRESSURIZAÇÃO (E DESPRESSURIZAÇÃO)



As rectas características da permeabilidade ao ar e dos componentes da ventilação da habitação são obtidos da seguinte forma:

$$Q_{chaminé} = Q_{S1} - Q_{S2}$$

$$Q_{janelas} = Q_{S2} - Q_{S3}$$

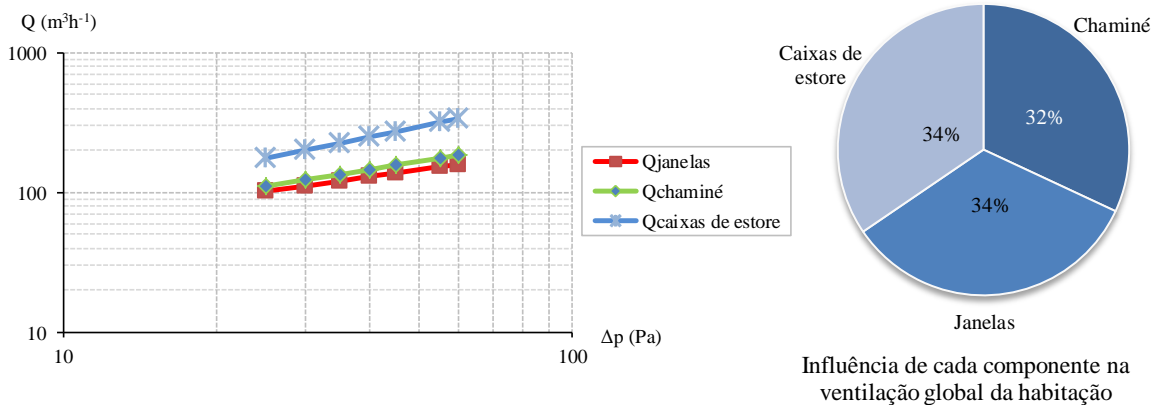
$$Q_{fachada} = Q_{S3}$$

A permeabilidade definida por “fachada” representa um diverso conjunto de infiltrações de difícil localização e caracterização. No entanto dado o tipo de construção, prevê-se que os resultados obtidos correspondam à permeabilidade das caixas de estore.

	$Q_{chaminé}$ ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )	$Q_{janelas}$ ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )	$Q_{fachada}$ ( $m^3 \cdot h^{-1}$ )
25	111,19	101,63	176,65
30	123,56	111,90	202,53
35	135,06	121,29	227,36
$\Delta p$ (Pa) 40	145,86	129,97	251,31
45	156,10	138,06	274,52
55	175,17	152,85	319,10
60	184,14	159,66	340,62
$Q = C\Delta p^n$	$17,4\Delta p^{0,576}$	$19,4\Delta p^{0,516}$	$15,8\Delta p^{0,75}$

Considerando a área de envidraçados da habitação ( $A_{env} = 7,77 \text{ m}^2$ ) e de acordo com a norma EN 12207:1999, para 50 Pa, a permeabilidade ao ar da caixilharia é de classe 2 ( $133 < Q_{janelas} < 45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ).

PERMEABILIDADE AO AR DE VÁRIOS COMPONENTES





Processo nº 01

## 1. COEFICIENTES DE PRESSÃO DEVIDO AO VENTO

O edifício e restantes edifícios vizinhos (obstáculos) foram modelados utilizando a aplicação *Cp Generator* para a determinação dos coeficientes de pressão ( $C_p$ ) em cada fachada da habitação e cobertura segundo diferentes direcções do vento.

Coef. de Pressão	Direcção do vento							
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Fachada NE	+0,33	+0,14	-0,39	-0,43	-0,44	-0,54	-0,91	+0,05
Fachada SO	-0,19	-0,16	-0,29	+0,28	+0,82	+0,41	-1,11	-0,25
Fachada NO	-0,66	-0,22	-0,13	-0,41	-1,01	+0,26	+0,36	+0,07
Cobertura	-0,51	-0,17	-0,39	-0,75	-1,05	-0,86	-0,51	-0,41

## 2. CENÁRIOS DE MELHORIA

Para o estudo do comportamento do sistema de ventilação da habitação foram definidas diversas medidas, normalmente implementadas, de melhoria ou com inferência na ventilação natural.

- M0, situação actual da habitação (cenário base);
- M1, melhoria da permeabilidade das caixas de estore através de meios simples e económicos (calafetagem das frinchas).
- M2, substituição das janelas existentes (classe 2) por janelas da classe 4 (EN 12207:1999) de alumínio e vidro duplo;
- M3, instalação de exaustor (obstruindo a saída da chaminé quando desligado);
- M4, igual a M2 sendo instalado um exaustor na chaminé (obstruindo a saída da chaminé quando desligado);
- M5, igual a M2 sendo instaladas grelhas auto-reguláveis nas janelas de classe 4;
- M6, igual a M4 sendo instaladas grelhas auto-reguláveis nas janelas de classe 4.

Quadro 1 – Síntese os cenários de reabilitação e medidas propostas.

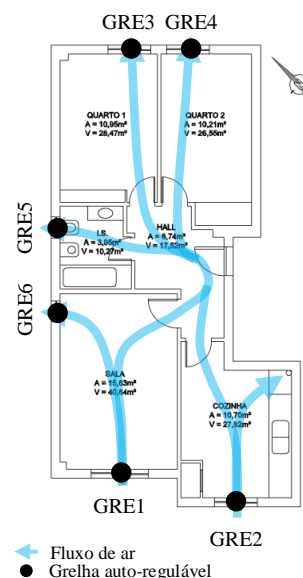
Cenários	Medidas de melhoria			
	Calafetagem das caixas de estore	Substituição da caixilharia	Instalação de exaustor*	Grelhas auto-reguláveis
M0				
M1	●			
M2			●	
M3		●		
M4		●	●	
M5		●		● (A)
M6		●	●	● (B)

Caudal nominal das grelhas auto-reguláveis a 2 Pa, a instalar nas janelas ( $m^3h^{-1}$ ):

(A) GRE1, GRE2, GRE3, GRE4 = 45; GRE5 = 30; GRE6 = 15.

(B) GRE1, GRE2, GRE3, GRE4 = 60. GRE5 = 30; GRE6 = 15.

\*A instalação de exaustor na chaminé, não se considerando uma medida directa de melhoria do sistema de ventilação, no entanto tem um impacto significativo (selagem da chaminé) e assim considerado neste estudo.



Quadro 2 - Taxa de renovação do ar estimados para a situação actual e cenários melhoria.

Cenários	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
$R_{ph}$ ( $h^{-1}$ )	0,27 <sup>(1)</sup>	0,20 <sup>(1)</sup>	0,23 <sup>(1)</sup>	0,17 <sup>(1)</sup>	<0,1 <sup>(1)</sup>	0,56 <sup>(2)</sup>	0,58 <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Taxa de renovação de ar insuficiente, não assegura a qualidade do ar interior ( $< 0,6h^{-1}$ ).

<sup>(2)</sup> Apesar de inferior a  $0,6 h^{-1}$ , é um valor aceitável para a validação do sistema de ventilação proposto.

### 3. CONCLUSÕES

Do trabalho experimental foi evidenciado que para situação actual da habitação (M0) a taxa de renovação do ar encontra-se abaixo do recomendado ( $0,27 < 0,60 \text{ h}^{-1}$ ) por forma assegurar a QAI, obrigando a garantir renovações de ar por outra via. O valor do indicador  $n_{50}$  de  $3,5 \text{ h}^{-1}$  traduz igualmente reduzida permeabilidade ao ar da envolvente. Neste sentido, é essencial em qualquer acção de melhoria a instalação de grelhas de admissão de ar (grelhas auto-reguláveis), evidenciado pelos resultados dos cenários de M1 a M4.

Os cenários M5 e M6 demonstram o impacto positivo das grelhas de admissão de ar no sistema de ventilação natural da habitação, alcançando valores de  $R_{ph}$  próximos aos recomendados regulamentarmente. Comparando estes cenários, nomeadamente os respectivos valores de  $R_{ph}$  e número de grelhas instaladas, recomenda-se manter a chaminé do fogão desobstruída (sem instalação de exaustor).



