

Extracto de desenho sobre escoamentos de Leonardo da Vinci

Maria de Fátima Teixeira Rocheta Gomes

**AVALIAÇÃO DAS TAXAS DE
INFILTRAÇÃO DE AR NO SECTOR
RESIDENCIAL**

Estudo experimental de campo pelo método do CO₂ metabólico



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Trinta raios, em conjunto, formam o centro de uma roda.
É precisamente o que nele não existe
que dá utilidade ao veículo.

Molda-se o barro para fazer um vaso.
É precisamente o que nele não existe
que dá utilidade ao vaso.

Furam-se as portas e as janelas para fazer uma sala.
É precisamente o que nela não existe
que dá utilidade à sala.

Por isso,
O que existe é o que lhes dá valor,
O que não existe é o que os torna úteis.

Lao Tse
tradução: António Miguel de Campos
em Tao Te King – Livro do Caminho e do Bom Caminhar
Relógio de Água, 2010

AGRADECIMENTOS

Na hora de concluir a presente dissertação, tendo na mente todas as pessoas que de qualquer modo me apoiaram, desejo especialmente agradecer:

Ao meu orientador principal, Prof. Doutor Manuel Carlos Gameiro da Silva, pela indefectível disponibilidade e solícitude que sempre manifestou em todos os momentos do trabalho.

Ao meu co-orientador, Prof. Doutor Nuno Albino Simões, pela pronta ajuda e todos os esclarecimentos prestados sempre que recorri ao seu auxílio.

À Prof.^a Doutora Ilda Abreu Noronha em nome do Centro de Geologia da Universidade do Porto, pela prestimosa colaboração na cedência de dados meteorológicos da maior relevância para o meu estudo.

Ao Prof. Mestre Válter de Carvalho, pelas informações pertinentes e importantes, prestadas na área da meteorologia.

À Prof.^a Mestre Anabela Duarte Carvalho, companheira de tantas horas ao longo deste Mestrado, pelos esclarecimentos prestados ao nível da sua formação.

Aos amigos que amavelmente me facultaram as suas casas para as medições e demais diligências necessárias.

Aos meus familiares e ao Jorge Nuno, a quem devo todo o apoio e compreensão propícios à realização desta tarefa.

Bem hajam!

TÍTULO: Avaliação das taxas de infiltração de ar no sector residencial: estudo experimental de campo pelo método do CO₂ metabólico

RESUMO

O consumo de energia final no sector residencial em Portugal tem aumentado desde há duas décadas, contra a tendência da maioria dos países da União Europeia. A actual legislação portuguesa sobre o desempenho térmico dos edifícios (RCCTE) também considera os aspectos da Qualidade do Ar Interior (QAI). A taxa mínima regulamentar é de 0,6 renovações horárias mas persiste a incerteza da sua magnitude nos edifícios novos e existentes. Devido aos esforços para melhorar o isolamento da envolvente exterior dos edifícios residenciais, a renovação do ar interior tornou-se um mecanismo relevante de dissipação de energia. Pretende-se a avaliação das taxas de infiltração de ar no sector residencial, em condições de ventilação natural, para uma melhor caracterização do parque habitacional e para a delimitação de estratégias de melhoria do desempenho energético dos edifícios e de poupança de energia.

Realizaram-se várias medições de campo em 20 residências do Distrito do Porto, em condições de ocupação regular, utilizando as técnicas transientes do método dos gases traçadores e o CO₂ metabólico dos residentes como gás traçador.

As taxas de infiltração de ar obtidas variaram entre 0,15h⁻¹ e 0,46h⁻¹. Para a amostra estudada, as taxas regulamentares actuais de renovação do ar variam entre 0,87h⁻¹ e 1,2h⁻¹, e entre 0,3h⁻¹ e 2,65h⁻¹ no futuro regulamento. Neste último, algumas das habitações de uma só fachada não cumprem a nova taxa mínima regulamentar (0,4h⁻¹) por inibirem a ventilação cruzada. As restantes não cumprem a taxa de referência do novo regulamento (0,6h⁻¹) por se considerarem muito permeáveis ao ar mas verifica-se uma sobrestimação da pressão dinâmica do vento nas fachadas. Não se obteve qualquer correlação com a extensão linear das caixilharias, possivelmente devido à sua fraca permeabilidade ao ar. Excepto em três habitações, as concentrações máxima absolutas de CO₂ interiores são inferiores a 1500ppmv apesar de mais de metade das habitações não cumprirem os caudais de referência de ar novo por ocupante (30m³.h⁻¹ para salas de estar e quartos de edifícios residenciais, definidos no Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios-RSECE). Considera-se haver condições ideais para a promoção e implementação de soluções inovadoras de ventilação natural controlada baseadas em critérios exigenciais definidos pelos ocupantes residenciais, embora

também seja necessária uma pesquisa sobre a QAI percebida através de métodos indirectos.

Palavras-chave: Infiltrações de ar; taxas de renovação horária; método dos gases traçadores; CO₂ metabólico; edifícios residenciais.

TITLE: Assessment of air infiltration rates in the residential buildings: an experimental field study with the tracer gas method by the metabolic CO₂

ABSTRACT

Final energy use in households in Portugal has been increasing for the last two decades, against the tendency in most EU countries. The current Portuguese regulation on the thermal performance of buildings (RCCTE) also considers Indoor Air Quality aspects (IAQ). The regulatory minimum infiltration rate is 0,6 air exchanges per hour but some uncertainty persists about its magnitude in the existing and newly built houses. Due to the efforts carried out to better insulate the envelopes of buildings, the indoor air renovation became a relevant mechanism of energy dissipation. The aim of this study is the assessment of air infiltration rates in the naturally ventilated residential buildings in order to design the strategies to improve energy performance and promote energy savings.

Several series of trials were performed to measure the infiltration rate at 20 dwellings in the Oporto District, under regular occupation, using the tracer gas method by the metabolic CO₂ of the residents as tracer gas.

The obtained air infiltration rates varied between 0,15h⁻¹ and 0,46h⁻¹. For the studied sample, the regulatory air change rates rates vary between 0,87h⁻¹ and 1,2h⁻¹ and between 0,3h⁻¹ and 2,65h⁻¹ in the current and the future regulation, respectively. In the last one, some dwellings with a single facade do not meet the new minimum regulatory rate (0,4h⁻¹) because they inhibit the cross ventilation. The others do not meet the reference air change rate of the future regulation (0,6h⁻¹) because they are considered little airtight but there is an overestimation of the wind dynamic pressure on the facades. There is no correlation between the obtained infiltration rates and the window frame length factor, possibly due to its good air tightness. Except in three dwellings, the maximum indoor CO₂ concentrations were lower than 1500ppmv, although more than half of the dwellings do not reach the reference fresh air flow rate per occupant (30m³.h⁻¹ for living rooms and bedrooms in residential buildings, defined in the Regulation of Energy Systems for Climate Control in Buildings - RSECE). There are ideal conditions for the promotion and implementation of innovative solutions about demand controlled natural ventilation applied to the residential buildings, set up by their occupant's requirements, although also a post-occupancy survey on the perceived IAQ through indirect methods is required.

Key-words: Air infiltration; air exchange rate; tracer gas method; metabolic CO₂; residential buildings.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento e motivação	1
1.2 Revisão bibliográfica.....	2
1.3 Objectivos.....	15
1.4 Estrutura da dissertação.....	16
2 MÉTODO E METODOLOGIA	17
2.1 Fundamentação teórica do método dos gases traçadores	17
2.2 Caracterização dos gases traçadores	20
2.3 O CO ₂ metabólico como gás traçador	21
2.4 Princípio de detecção e medição do gás traçador.....	24
2.4.1 Instrumentos de medição utilizados no estudo de campo	25
2.5 Técnica do decaimento das concentrações com o CO ₂ metabólico	26
2.5.1 Tratamento de dados na técnica do decaimento das concentrações.....	27
2.6 Técnica da emissão constante de CO ₂ metabólico	27
2.6.1 Tratamento de dados na técnica da emissão constante de CO ₂	28
2.7 Metodologia e determinação da taxa de renovação do ar regulamentar	29
3 RESULTADOS	30
3.1 Descrição e caracterização da amostra residencial do estudo de campo.....	30
3.2 Análise dos resultados das medições efectuadas.....	34
3.3 Determinação das taxas regulamentares segundo o RCCTE	39
3.4 Determinação das taxas regulamentares segundo a proposta de revisão do RCCTE	42
3.5 Avaliação da relação entre a QAI e os caudais obtidos ou recomendados	48
3.6 Discussão de resultados.....	56
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
4.1 Conclusões	70
4.2 Futuros desenvolvimentos.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução típica das concentrações, C_i , do gás traçador no tempo, t : com injeção ou geração do gás traçador na fase inicial; na ausência de injeção ou geração na fase final .	18
Figura 2 - Representação gráfica do balanço das concentrações de um gás traçador presente no ar atmosférico com geração interna (ou injeção) e deposição nas superfícies e materiais (adaptado de Moret Rodrigues <i>et al.</i> , 2009).....	19
Figura 3 – Distribuição espacial das concentrações em espaço unizona: uniforme à esquerda; não uniforme inicial resultante de uma fonte emissora pontual à direita.....	22
Figura 4 - Justaposição da função exponencial sobre os dados experimentais da evolução temporal do decaimento da concentração de CO_2 com a respectiva regressão linear.....	27
Figura 5 – Fases estacionárias e perturbações na evolução crescente das concentrações em duas das habitações estudadas (habitação #10 à esquerda e habitação #14 à direita).....	28
Figura 6 - Determinação da taxa de infiltração de ar pela técnica da emissão constante e correlação do processo de regressão linear dos dados experimentais da evolução de CO_2 com os da função exponencial	29
Figura 7 – Localização geográfica das habitações	31
Figura 8 – Taxas de infiltração de ar obtidas pela técnica do decaimento.....	34
Figura 9 – Taxas de infiltração de ar obtidas pela técnica da emissão constante	35
Figura 10 – Relação entre as taxas de infiltração de ar obtidas <i>in situ</i> e o Factor de Extensão Linear das Caixilharias.....	38
Figura 11 – Taxas médias de infiltração de ar obtidas <i>in situ</i> e taxas de infiltração regulamentares estimadas.....	39
Figura 12 – Caudais de ar novo por ocupante, temperatura do ar e humidade relativa interiores e concentrações de CO_2 máximas registadas e de equilíbrio estimadas	52
Figura 13 - Instalação experimental de sensores de CO_2 e humidade para janelas com actuadores motorizados numa sala de aulas da Universidade de Lyon (Fonte: El Mankibi <i>et al.</i> , 2011)	68
Figura 14 - Sensores, controladores e actuadores motorizados comerciais para vãos envidraçados (Fonte: http://www.airtherm.co.uk/ e http://www.secontrols.com/window-automation/)	68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Características e taxas de emissão de CO ₂ de alguns ocupantes da amostra	23
Tabela 2 - Características gerais das habitações	32
Tabela 3 - Características construtivas e dimensionais das habitações.....	32
Tabela 4- Valores das taxas médias obtidas em cada série de ensaios em cada técnica utilizada	36
Tabela 5 – Valores globais das taxas médias medidas e estimação das taxas regulamentares	37
Tabela 6 – Estimação das taxas de infiltração regulamentares segundo o RCCTE (D.L. 80/2006 de 4 de Abril)	40
Tabela 7 – Velocidades médias do vento corrigidas nos períodos de tempo dos ensaios.....	43
Tabela 8 – Parâmetros para a estimação das taxas de renovação do ar interior segundo a proposta de revisão do RCCTE apresentada para consulta pública	44
Tabela 9 - Parâmetros para a estimação das taxas de renovação do ar interior segundo a proposta de revisão do RCCTE (cont.)	45
Tabela 10 – Caudais de ar novo e rácios de volumetria e área por ocupante, concentrações absolutas de CO ₂ medidas, registo de patologias das habitações analisadas	49
Tabela 11 – Valores de referência segundo a EN 15251:2007 para edifícios novos, remodelados ou existentes.....	50
Tabela 12 – Taxas horárias de infiltração e caudais de ar novo por ocupante obtidos <i>in situ</i> e estimados pelo futuro RCCTE e pelos critérios da EN 15251	54

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Exemplo do registo efectuado em cada habitação	33
---	----

LISTA DE ACRÓNIMOS

ASTM – American Society for Testing and Materials

CFD – Computational Fluid Dynamics

CO₂ – Dióxido de Carbono

EN – European Norm

EPBD – European Performance of Buildings Directive

HR – Humidade Relativa

ISO - International Organization for Standardization

QAI – Qualidade do Ar Interior

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

RPH – Renovações por Hora

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e motivação

A preocupação com o controlo das infiltrações de ar nos edifícios, para a melhoria do conforto térmico e para a redução das necessidades de energia de climatização interior, existe desde tempos antigos. Porém, foi desde a primeira grande crise energética da segunda metade do século XX (nacionalização do Canal do Suez, 1956), desencadeada num contexto de défice de oferta de combustíveis fósseis com o conseqüente aumento significativo do seu preço, que se tornou relevante a pesquisa sobre a influência das taxas de ventilação e de infiltração no desempenho energético dos edifícios. Nos anos 70 e ulteriores (particularmente 1973, 1979/80, 1991), em momentos de crise energética de origem económica ou bélica, ou ambas, as exigências de ventilação seriam reconsideradas no sentido da redução dos caudais requeridos em conjunção com uma maior estanquidade ao ar e um maior isolamento térmico das envolventes dos edifícios.

É nos anos 90 que se desenvolve o conceito de concepção integrada que, incluindo aspectos ambientais e outros critérios de qualidade tecnológica e construtiva, conduziu igualmente à análise de desempenho energético dos edifícios. Mais recentemente, as ameaças à segurança do abastecimento energético à Europa Central e de Leste, com as sucessivas crises do fornecimento do gás natural russo (2006, 2009 e previsivelmente 2013), e a nova crise petrolífera de base especulativa, desde 2008, foram determinantes para a prossecução destes objectivos de poupança energética. A instabilidade política e a guerra no Norte de África em 2011 ameaçaram mais uma vez a segurança energética de alguns Estados Membros (EM) da União Europeia (UE), entre os quais Portugal.

Apesar da, ainda, significativa contribuição do sector dos edifícios residenciais no consumo da energia final na UE - representa 24,6% na EU e 17,0% em Portugal¹ - tem-se verificado uma diminuição generalizada deste consumo após 2006² (Eurostat, 2010 e 2011). As excepções são a Dinamarca, o Luxemburgo e Portugal, com consumos bastante estacionários desde 2005, a Finlândia com um aumento progressivo ligeiro desde 2000, e a Espanha com aumento severo dos consumos desde 1990. Desde esta data, Portugal acompanhou a Espanha na tendência contínua de subida, embora com maior atenuação nos últimos anos. Num

¹O consumo de energia final do sector dos serviços, indústria, transportes e agricultura representam, respectivamente, 12,5%, 27,9%, 32,6% e 2,4% na EU e 11,7%, 31,4%, 38,3% e 1,6% em Portugal.

² Evolução dos consumos desde 1990 actualizados até 2007.

contexto de crise económica, com o crescimento negativo do PIB, é indispensável a melhoria do desempenho energético dos edifícios como um instrumento de redução da dependência de energia fóssil importada.

Estes indicadores são, no entanto, representativos dos esforços legislativos e reguladores do Parlamento Europeu e do Conselho da EU, cujas directivas relativas ao desempenho energético dos edifícios têm fixado objectivos progressivamente mais exigentes de eficiência e conservação energética. A reformulação da Directiva Europeia de Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD recast, 2010) estabelece o objectivo ambicioso da redução do consumo de energia primária de origem fóssil em 20% até 2020, abrangendo todos os edifícios novos, públicos ou privados, que deverão vir a ter necessidades quase nulas de energia. A nova EPBD imprime um novo desafio à poupança energética que se prefigura como um recurso e um objectivo económico no âmbito da “Estratégia Europa 2020” para o crescimento económico inteligente, sustentável e inclusivo. Contudo, as estimativas da Comissão apontam já para o incumprimento destes objectivos (Plano de Eficiência Energética da Comissão Europeia, 2011).

A melhoria do desempenho energético dos edifícios residenciais tem sido alcançada sobretudo com a melhoria da eficiência térmica da envolvente opaca através da utilização generalizada de sistemas de isolamento térmico. Actualmente, a renovação do ar interior tornou-se o principal mecanismo de dissipação de energia para o exterior; dois terços do consumo energético em edifícios residenciais destinam-se ao aquecimento ambiente (Plano de Eficiência Energética da Comissão Europeia, 2011).

Assim, existe um grande potencial de poupança energética pela redução das necessidades de energia de aquecimento e de arrefecimento através da melhoria da estanquidade das envolventes, das condições de selagem das caixilharias e do controlo dos caudais de ventilação. Como as infiltrações “naturais” são a forma principal de renovação do ar na maioria dos edifícios residenciais portugueses, é fundamental o conhecimento da magnitude desses caudais e das condições para a implementação das inovadoras soluções de ventilação natural controlada baseados em critérios exigenciais definidos pelos utentes destes espaços.

1.2 Revisão bibliográfica

A ventilação é o processo pelo qual, através de trocas de ar entre um espaço interior (sistema) e o seu ambiente envolvente (vizinhança), se faz a remoção dos poluentes e o controlo da

humidade e da temperatura. Assim, as taxas de renovação associadas a estes fluxos de ar são frequentemente indicadoras da QAI e do conforto higrotérmico interiores.

Por outro lado, a maior ou menor estanquidade dos edifícios (fronteira) tem influência na qualidade do ambiente acústico e higrotérmico, e pode afectar igualmente a QAI e a capacidade de protecção contra o fumo em caso de incêndio (Montoya *et al.*, 2011; Amaral, 2008; Santamouris *et al.*, 2008; Santos, 2008; Jardinier *et al.*, 2006; Dorer *et al.*, 2004). As frinchas, ranhuras e outras pequenas aberturas constituem pontes fónicas e um potencial meio de entrada de poluentes ambientais exteriores³ e de águas pluviais e ascensionais, ou um meio de comunicação para os poluentes interiores.

As infiltrações são os escoamentos de ar não controlados e não intencionais que podem co-existir com os sistemas de ventilação natural ou mecânica. A imprevisibilidade destes caudais e a sua contribuição no total dos caudais de ventilação levam, amiúde, à sobrestimação das taxas de ventilação requeridas, contribuindo para a incerteza⁴ nos modelos de concepção projectuais (Liddament, 1986). Representam perdas de calor no Inverno, excesso de carga térmica diurna no Verão (Dorer *et al.*, 2004), e afectam o desempenho dos sistemas de ventilação mecânica ou híbrida (Amaral, 2008). As infiltrações podem representar uma fracção significativa do ar que entra nos edifícios com extracção mecânica, independentemente da qualidade da estanquidade das respectivas envolventes e da existência de dispositivos de admissão natural. Também nos edifícios com outros sistemas mecânicos não balanceados podem ocorrer infiltrações (ou exfiltrações) significativas devidas às diferenças de pressão entre o interior e o exterior (Dorer *et al.*, 2004).

Assim, no contexto contemporâneo exige-se o conhecimento da magnitude dos caudais de ventilação, em função do tipo de utilização e do nível de ocupação dos edifícios, para as necessidades de oxigénio das actividades humanas e para o varrimento das cargas poluentes geradas internamente, principalmente as antropogénicas (Liddament, 1996), sem a alteração indesejável da temperatura e da velocidade do ar interior, e atendendo simultaneamente às exigências de economia de energia.

³ Esta avaliação é particularmente relevante nas zonas industrializadas abrangidas pela Directiva Seveso II relativa ao controlo dos perigos associados a acidentes graves que envolvem substâncias perigosas.

⁴ A incerteza implica um intervalo de valores no qual se encontra o valor da mensuranda, enquanto o erro diz respeito ao desvio entre um resultado de uma dada medição e o “valor verdadeiro” único, e na prática desconhecida, da grandeza medida. Actualmente utiliza-se o conceito de incerteza, devido às limitações da abordagem do erro (ISO/IEC, 2007/ IPQ, 2008).

Historicamente, os edifícios eram ventilados através do efeito das infiltrações, ou das exfiltrações, cujo controlo requeria um esforço contínuo de manutenção dos edifícios (Sundell, 2004). A preocupação em estabelecer caudais mínimos de ventilação surge com os estudos de Lavoisier sobre o metabolismo humano em meados do século XVIII que estabelecem o CO₂ como um indicador da QAI e a relação quantitativa metabólica entre a geração de CO₂ e o consumo de oxigénio (Sundell, 2004). No entanto, ao longo do século XIX, as necessidades de ventilação definiram-se em função das concentrações de CO₂ baseadas em critérios sensoriais e só no início do século XX, com Winslow e Palmer em 1915, é que surgem questões de saúde, associados ao tempo de exposição às cargas poluentes, como critério de QAI (Sundell, 2004 e Amaral, 2008). Com as crises energéticas da segunda metade do século XX vem associar-se a necessidade de conservação energética às estratégias de ventilação (Awbi, 1998).

Mas a primeira proposta de redução das taxas de ventilação surge antes, num enquadramento distinto, com o estudo de Yaglou (1936) baseado essencialmente em critérios sensoriais (Sundell, 2004). Os estudos de campo sobre a importância da estanquidade dos edifícios, relacionando todos os factores, energético, ambiental interior, bem como os da qualidade e da durabilidade da construção, surgiram, após a II Grande Guerra, nos Países Escandinavos, Canadá e Estados Unidos, devido à severidade dos seus climas típicos e à utilização generalizada no sector residencial de sistemas construtivos e estruturais ligeiros pré-fabricados em madeira; nestas pesquisas fazem-se já referências a higienistas do século XIX, como Pettenkofer que estabelece relações entre as diferenças de temperatura e as taxas de renovação do ar interior (Wallace *et al.*, 2002).

Um estudo pioneiro é o de Tamura e Wilson (1963) em que se analisa a relação da diferença de temperatura entre o interior e o exterior e o efeito da velocidade do vento nas taxas de renovação do ar, em duas residências de Otava construídas com sistemas aligeirados de madeira, obtidas por medições *in situ* através do método dos gases traçadores pela técnica da emissão constante⁵, utilizando o hélio como gás traçador. Outro método muito utilizado em medições de campo, para a avaliação da estanquidade, é o método da pressurização,

⁵ As outras técnicas são a da concentração constante ou de equilíbrio, em regime estacionário, e a do decaimento da concentração em regime transiente ou instacionário.

vulgarmente designado por método da “Porta Ventiladora” (Silva, 1991). Actualmente, ambos os métodos são objecto de normalização específica⁶.

Este último método adquiriu relevância recente em alguns EM⁷ da EU, com a transposição da EPBD, devido à implementação de requisitos mínimos de estanquidade ou à obrigatoriedade da sua verificação de conformidade *in situ*⁸ (Erhorn-Kluttig *et al.*, 2009). O método da pressurização permite a medição dos caudais, insuflados ou extraídos, ajustada a diferentes diferenças de pressão entre o interior e o exterior, mais frequentemente a 50 Pa (n_{50})⁹. A vantagem deste método sobre o dos gases traçadores é a da sua menor dependência das condições climatéricas exteriores (acção do vento e efeito de impulsão térmica), pela manipulação das condições de pressão interior, o que permite fazer comparações da permeabilidade ao ar entre edifícios e avaliar a qualidade da reabilitação das envolventes (Amaral, 2008). Por isso não permite a utilização dos dados obtidos na estimação dos caudais de infiltração em condições “naturais”. Em Sfakianaki *et al.* (2008) estabelece-se a relação entre as taxas de infiltração obtidas pelo método de pressurização (n_{50}) e as taxas horárias de infiltração média obtidas pelo método dos gases traçadores, durante a época de arrefecimento, em 20 casas da Ática (Grécia), concorrendo para a compreensão da influência da qualidade de construção e das condições ambientais exteriores na magnitude das taxas de infiltrações.

No início dos anos 80, fundamentalmente por questões de poupança energética, as taxas de ventilação recomendadas ou prescritas diminuem novamente. Estudos realizados na Dinamarca e Suécia concluem que a maioria das habitações ventiladas naturalmente não cumpre os mínimos legais de $0.5h^{-1}$ (Bekö *et al.*, 2010); e outros estudos norte-americanos mais intensivos, realizados entre 1982-87 e 1999-2001 e abrangendo 3344 habitações, concluem que as taxas medianas obtidas, $0.51h^{-1}$ e entre $0,61h^{-1}$ e $1,07h^{-1}$, respectivamente, são inferiores no Inverno, sobretudo nas zonas climáticas setentrionais mais rigorosas (Murray e Burmaster, 1995 e Yamamoto *et al.*, 2010, citados por Bekö *et al.*, 2010). Estes estudos revelam a melhoria das condições de estanquidade das envolventes dos edifícios, com um desagravamento a partir dos anos 90, apesar de estas habitações não serem plenamente representativas do parque habitacional norte-americano.

⁶ EN 13 829 “Thermal performance in buildings and materials – Determination of air permeability of buildings – Fan pressurization method” e EN ISO 12 569 “Thermal performance in buildings and materials – Determination of specific airflow rate in buildings – Tracer gas dilution method”.

⁷ Nomeadamente na República Checa, Países Baixos, Grã-Bretanha, Alemanha e Finlândia (Erhorn-Kluttig *et al.*, 2009).

⁸ Obrigatório no Reino Unido e em certos sistemas de certificação energética voluntária, na Alemanha quando existem sistemas de ventilação mecânica, na Dinamarca quando solicitado pelas autoridades competentes e na Finlândia para comprovar a redução da estimação da taxa de permeabilidade (Erhorn-Kluttig *et al.*, 2009).

⁹ ACH_{50} ou n_{50} na literatura estrangeira.

Nos países do Sul da Europa as fontes de infiltração através da envolvente opaca têm um menor impacto devido às características da sua construção “pesada”, tendo origem principalmente nos pontos de transição entre diferentes sistemas ou materiais construtivos. Mais recentemente, a utilização de caixilharias de elevado desempenho energético e de reduzida permeabilidade ao ar tem permitido uma redução adicional do nível de infiltrações de ar e das respectivas taxas de renovação das habitações. Esta redução extrema das taxas de ventilação conduziu a problemas de saúde ou a sintomas de doença ocasionais durante os períodos de permanência no interior dos edifícios de serviços¹⁰ (Seppänen e Fisk, 2004). Desde então, existem estudos que estabelecem a associação entre a prevalência de doenças alérgicas e de asma com a baixa renovação do ar interior (Nafstad *et al.*, 1997 citado em Oie *et al.*, 1998; Su, H.-J. *et al.*, 2006; Kajtár *et al.*, 2006; Santamouris *et al.*, 2008; Bekö *et al.*, 2010).

No entanto, Sundell (2004) refere a necessidade de um maior número de estudos que estabeleçam uma melhor compreensão entre as necessidades de ventilação e a QAI na perspectiva dos critérios de saúde em oposição aos de conforto sensorial. Santamouris *et al.* (2008) referem diversos estudos em edifícios do sector terciário que relacionam as taxas de ventilação com a QAI, estabelecendo relações entre as concentrações de CO₂, os caudais de ar novo por pessoa e a frequência de sintomas de doença. Aliás, este estudo, realizado em várias escolas ventiladas naturalmente, investiga e estabelece uma relação directa entre a magnitude dos fluxos e os modelos de ventilação¹¹ e as concentrações de CO₂ e, por outro lado, entre aqueles e as diferenças de temperatura entre o interior e o exterior; e, ainda, destas últimas com as acções adaptativas dos ocupantes para a melhoria da qualidade do ambiente interior.

Outro estudo recente, relevante e intenso, é o de Bekö *et al.* (2010) em 500 quartos de crianças dinamarquesas utilizando o método dos gases traçadores com o CO₂ metabólico dos ocupantes, através das suas três técnicas, para discutir a relação entre as taxas de renovação de ar nesses espaços e as concentrações máximas de longa e curta exposição admissíveis para esse poluente antropogénico.

Em Portugal, Santos (2008) realizou um estudo idêntico aplicado aos quartos de dormir em 2 apartamentos, recorrendo ao mesmo método para a obtenção das taxas de renovação, e Asadi *et al.* (2011) e Gameiro da Silva *et al.* (2010) também o aplicam, pela técnica do decaimento

¹⁰ O conjunto típico destes sintomas constitui o designado “Síndrome do Edifício Doente”.

¹¹ Dizem respeito aos fluxos por infiltrações com as janelas fechadas e aos fluxos intencionais com as janelas abertas com ocupação das salas ou sem ocupação das salas.

das concentrações, aos quartos de dormir de um hotel e a uma agência bancária, respectivamente, no âmbito de auditorias à QAI. Também se utiliza a técnica da emissão constante para a estimação da taxa de renovação ou de ventilação ajustada à concentração máxima admissível, ou desejável em função do tempo de exposição, para um determinado poluente ou para o CO₂ metabólico que é, geralmente, o poluente mais frequente no sector residencial (Liddament, 1996); a concentração final (concentração de equilíbrio) seria equivalente à concentração máxima requerida (Santos, 2008). Porém, é difícil garantir as condições de concentração constante ou de equilíbrio em espaços ocupados devido à variabilidade das fontes de CO₂ metabólico; a utilização de dados obtidos em regime transiente na equação do balanço mássico em regime permanente pode implicar uma sobrestimação da taxa de renovação, conforme dados empíricos (Santamouris *et al.*, 2008). No estudo de Santos (2008) raramente se atingem as concentrações de equilíbrio, bem como em Santamouris *et al.* (2008), devido à variabilidade da ocupação das salas de aula e à abertura frequente das janelas.

É no contexto da avaliação das necessidades de ventilação para a QAI que se têm, frequentemente, utilizado as técnicas do método dos gases traçadores. Através da monitorização da evolução das concentrações de CO₂ gerado pelos próprios ocupantes durante o seu tempo de permanência nos espaços obtêm-se, ou corrigem-se, as taxas reais de renovação do ar, que são inversamente proporcionais à idade do ar^{(*)=(29)} nesses espaços nas técnicas transientes. A utilização do CO₂ metabólico como gás traçador surge como alternativa à utilização dos gases activos, ou passivos, não presentes no ar atmosférico, devido às limitações da utilização do método convencional em espaços com ocupação real no que concerne à necessidade do uso de ventiladores para a garantia da uniformidade da distribuição espacial das concentrações. Estas são razões fundamentais para a adequabilidade da sua utilização no sector residencial e na avaliação das infiltrações de ar em condições de ventilação natural.

Outros estudos recentes¹² utilizam o “método do CO₂ metabólico”¹³ para a determinação das taxas de renovação horária do ar em condições de ocupação regular, caracterizando o efeito

¹² Em Portugal, desde os anos 80, têm sido realizados vários outros estudos, tanto experimentais como teóricos, utilizando gases traçadores convencionais, nomeadamente os da tese de Doutoramento de Maldonado, E. (1982) submetida à Universidade do Estado de Iowa, os das teses submetidas à FEUP, de Mestrado e Doutoramento de Afonso, C. (1986 e 1989), de Mestrado de Silva, A. (1991), de Mestrado de Finteiro, A. (1999) e de Doutoramento de Amaral, M. (2008), e ainda, utilizando o CO₂ metabólico como gás traçador, os da tese de Mestrado de Santos, J. (2008) submetida à FCT-UNL e os da tese de Mestrado de Abreu, J. (2009) submetida à FCTUC, os quais terão originado vários artigos científicos divulgados em congressos e conferências internacionais.

das condições climatéricas exteriores, dos comportamentos dos ocupantes e das características físicas dos edifícios nas taxas de ventilação ou de infiltração obtidas - Barankova *et al.* (2004), Naydenov *et al.* (2007), Stavova *et al.* (2007 e s/data), Guo e Lewis (2007) e Montoya *et al.* (2011), em espaços residenciais; Morse *et al.* (2009) e Santamouris *et al.* (2008), em salas de aulas de escolas; e Gameiro da Silva *et al.* (2010 e 2011), em edifícios de serviços. As técnicas experimentais de campo contribuem para uma melhor compreensão do fenómeno das infiltrações e do seu impacto energético em edifícios existentes (Liddament, 1986).

O estudo de Guo e Lewis (2007) determina as taxas de renovação de ar em seis residências unifamiliares irlandesas, pela técnica do decaimento das concentrações, utilizando apenas um quarto de dormir, baseado no pressuposto de que um pequeno espaço da habitação poderá ser representativo das infiltrações e da respectiva taxa de renovação total. Recorrendo a uma metodologia semelhante, em Naydenov *et al.* (2007), confirmam-se, por medições de campo em 12 quartos de dormir sob condições de ventilação natural, os resultados obtidos experimentalmente em laboratório sob condições controladas apresentados em Barankova *et al.* (2004), cujo objectivo foi o da verificação da adequabilidade da utilização do CO₂ metabólico como gás traçador sem o recurso à prévia mistura artificial com ventiladores. Os quartos de dormir reais foram seleccionados segundo distintos níveis de ocupação, volumetria, sistemas construtivos, número, tipologia e material das janelas, altura em relação ao solo e tipologia funcional das habitações; as medições realizaram-se em pleno Inverno, quando o sistema de aquecimento se mantém ligado continuamente.

Em dois outros estudos de Stavova (Barankova) *et al.* (s/data e 2007) estudam-se as taxas de renovação e a distribuição das concentrações de CO₂ no volume total de um apartamento com seis compartimentos e em duas habitações unifamiliares com oito e cinco compartimentos, reiterando a adequabilidade do “método do CO₂ metabólico”¹⁴ às condições de habitações de maior dimensão e maior número de espaços interiores individualizados. As habitações consideram-se ventiladas naturalmente – o exaustor das cozinhas não é accionado durante as medições – e estabelece-se um ponto de medição por compartimento individualizado. Em Montoya *et al.* (2011) caracterizam-se as taxas de renovação horária de 16 moradias unifamiliares na Catalunha e nos compartimentos destas moradias que possam funcionar como abrigos contra eventuais nuvens tóxicas em casos de acidentes químicos industriais, de

¹³ Em contraste com a utilização do CO₂ injectado, geralmente, aplicado em espaços não ocupados de grandes dimensões e em espaços experimentais laboratoriais, e para a avaliação da eficácia da ventilação mecânica.

¹⁴ Esta designação surge com Stavova (Barankova) *et al.* (s/data) e refere-se à utilização do CO₂ metabólico como gás traçador na técnica do decaimento das concentrações.

acordo com um nível de protecção regular que corresponda a medidas simples de reforço do encerramento de vãos e quaisquer aberturas com telas plásticas e fitas isoladoras durante o tempo de permanência nesses abrigos. Avalia-se a eficácia destas medidas através da fracção do fluxo de infiltração entre as duas configurações de “abrigo” e o espaço envolvente, bem como a correlação entre as taxas obtidas nas moradias e nos abrigos, e entre as taxas obtidas e as condições climatéricas exteriores.

No entanto, estes estudos experimentais em espaços ocupados não garantem, frequentemente, a representatividade estatística da gama do parque habitacional a analisar, ou baseiam-se em medições quase únicas de curta duração, que impedem a caracterização do efeito dos parâmetros físicos ambientais e dos comportamentos dos ocupantes nas taxas de renovação do ar. Assim, estes estudos tornam-se mais úteis para a modelação da QAI do que para o entendimento do fenómeno das infiltrações (Wallace *et al.*, 2002). Em Montoya *et al.* (2011), as moradias são seleccionadas em função da tipologia, idade da construção, área, número de pisos e localização, de modo a representar a gama de moradias construídas na região. Mas a inventariação de Persily *et al.* (2011) considera ainda o número de compartimentos interiores, a existência de garagem integrada, o tipo de estrutura e sistema construtivo, e o sistema de aquecimento, e sugere a adição complementar do número de ocupantes, do sistema de ventilação, e de outros parâmetros potencialmente correlacionáveis com as taxas de renovação em edifícios existentes.

Uma das desvantagens relevantes do método dos gases traçadores é de requerer muitas medições por períodos de tempo longos devido à influência das condições climatéricas exteriores nas taxas de infiltração ou de ventilação natural (Liddament, 1986; Gameiro da Silva *et al.*, 2011). Blomsterberg *et al.* (1995) recomenda a monitorização das concentrações de gás traçador por um período de um a sete dias para determinação das taxas de renovação horária. Em Stavova (Barankova) *et al.* (s/data e 2007) as medições prolongam-se por uma a duas semanas, em Guo e Lewis (2007) por dois a sete dias e em You *et al.* (2007) por três a cinco dias, enquanto em Bekö *et al.* (2010) duram dois dias completos e apenas um em Naydenov *et al.* (2007).

Devido à variabilidade sazonal dos factores climatéricos, as medições devem ser efectuadas em, pelo menos, duas épocas distintas. Em Oie *et al.* (1998), as medições são equilibradamente distribuídas ao longo de um ano pelo Inverno, Primavera e Outono; e em Montoya *et al.* (2011), efectuam-se medições no Verão e no Inverno.

As infiltrações dependem da localização e da exposição dos edifícios (que é uma função das características topográficas do terreno), das obstruções na envolvente (rugosidade), da orientação e distribuição dos vãos nas fachadas, da estanquidade da envolvente (que é uma função das suas características construtivas), da diferença de pressão entre o interior e o exterior (que é uma função da acção do vento e do efeito de impulsão térmica), das impedâncias internas (que são função da compartimentação espacial e das ligações interiores) e da combinação de todos estes parâmetros (Liddament, 1986; Awbi, 1998; Montoya *et al.*, 2009 e 2011; Persily *et al.*, 2010).

No estudo de Oie *et al.* (1998) sobre 344 residências de Oslo, realiza-se uma análise das taxas de renovação obtidas para as tipologias habitacionais agrupadas segundo os respectivos sistemas de ventilação. Não se verificam grandes diferenças nas taxas obtidas para as diversas tipologias habitacionais. Mas numa análise multivariável conclui-se que o volume das habitações, a temperatura exterior e o sistema de aquecimento convectivo a electricidade¹⁵ têm impacto significativo na taxa de renovação, e é inconclusivo relativamente às restantes variáveis independentes¹⁶. As variáveis independentes consideradas dizem respeito aos sistemas de ventilação e aquecimento, às características construtivas das habitações¹⁷ e às condições climatéricas exteriores¹⁸.

Na prática, a relação do efeito conjunto das diferenças de temperatura entre o interior e o exterior e da velocidade e direcção do vento nas infiltrações tem sido dificilmente interpretada. Em Wallace *et al.* (2002), citam-se inúmeros estudos, desde a década de 40, sobre o efeito combinado destes dois parâmetros físicos, evidenciando relações, tanto empíricas como teóricas, muito diversas. Porém, em vários estudos verifica-se um grande impacto da diferença de temperatura e o efeito fraco do vento cuja explicação poderá estar relacionada com a crescente estanquidade da envolvente nos edifícios mais recentes ou reabilitados. Em Montoya *et al.* (2011), confirma-se estas correlações tanto em relação às taxas de renovação horárias obtidas para as habitações como para os abrigos - sendo que as habitações são sobretudo afectadas pela velocidade do vento, excepto no Inverno devido à

¹⁵ A taxa de renovação horária é maior nos edifícios que possuem radiadores, em oposição aos que possuem sistemas de aquecimento convectivo a electricidade (Oie *et al.*, 1998). No entanto, neste estudo considera-se que a amostra pode não ser do parque habitacional norueguês.

¹⁶ As variáveis dependentes, os dados que se pretendem obter e por isso dependentes da investigação (variáveis de resposta), são explicitadas em função das variáveis independentes (Oliveira, 2011) que são os dados que resultam da formulação das hipóteses e por isso susceptíveis de produzir efeitos nas primeiras (variáveis explicativas).

¹⁷ Tipologia do edifício, material de construção, número de grelhas de ventilação, ano da construção, volume e índice de ocupação (m²/ocupante) e, ainda, o tipo de sistema de ventilação, gama do exaustor na cozinha, o tipo de energia primária de aquecimento.

¹⁸ Temperatura exterior, humidade relativa, velocidade do vento e precipitação.

intensificação da impulsão térmica e à baixa velocidade do vento verificada, enquanto que os abrigos são mais afectados pela diferença de temperatura, até porque alguns são interiores e não sujeitos à acção directa do vento.

A influência da acção do vento e da temperatura exterior nas taxas de infiltração pode variar bastante consoante o tipo do clima e a estação do ano, e as condições topográficas e de rugosidade dos sítios, enviesando-se nos climas quentes durante o Verão, devido ao crescente fenómeno de “ilha de calor” ou à fraca porosidade das grandes cidades que conduz à diminuição da velocidade do vento nos corredores urbanos (Liddament, 1986; Iwashita e Akasaka, 1997; Sfakianaki *et al.*, 2008).

Nestas situações, reduz-se a capacidade de arrefecimento passivo por ventilação natural, através das infiltrações ou da abertura de janelas e portas exteriores, conduzindo à utilização massiva de sistemas de ventilação e de arrefecimento activos. Iwashita e Akasaka (1997) realizam um estudo, durante os meses de Julho e Agosto, em oito moradias contemporâneas que possuem bombas de calor para climatização com funcionamento descontínuo, relacionando as taxas renovação por infiltração (com os aparelhos desligados e os espaços não ocupados) e as taxas de renovação durante a ocupação dos espaços com os aparelhos eventualmente ligados ou as janelas abertas, para avaliar do impacto do consumo de energia de arrefecimento e da sua relação com os hábitos de ventilação natural dos residentes. Concluíram que, nos espaços residenciais ocupados, existe alguma independência dos hábitos de ventilação face a diversas variáveis, o que é corroborado pelos estudos de outros autores (Oie *et al.*, 1998). Aqui, mais do que nos edifícios de serviços, as pessoas vivem de acordo com os seus critérios individuais de conforto térmico e de economia de energia revelando grande adaptabilidade térmica a ambientes não climatizados pela utilização de forma eficaz dos sistemas passivos (Iwashita e Akasaka, 1997; Santamouris *et al.*, 2008; Daghigh *et al.*, 2009; Bekö *et al.*, 2010). Em certas condições climáticas extremas, estes comportamentos parecem ter maior impacto nas taxas de renovação do ar interior do que as diferenças de temperatura e a acção do vento.

Quanto à magnitude, as taxas de renovação mínimas são mais controladas pelas características do edifício (Wallace *et al.*, 2002), enquanto as máximas são sobretudo o resultado da manobra de janelas ou portas exteriores (Stavova (Barankova) *et al.*, s/data). Em Wallace *et al.* (2002) e Santamouris *et al.* (2008), evidenciam-se relações estatísticas entre a diferença de temperatura interior/exterior inicial e a abertura das janelas, e entre a temperatura interior, a

abertura das janelas e os caudais resultantes, como também o facto de a diferença de temperatura, após a abertura de janelas por períodos tempo longos deixar de ser a força motriz da renovação do ar interior.

O método dos gases traçadores constitui um método de utilização fácil e rentável (You *et al.*, 2007) e tornou-se usual na quantificação das taxas de renovação do ar interior (Mahyuddin e Awbi, 2010), mas possui a desvantagem de apresentar uma potencial inexactidão significativa quando a mistura do gás traçador num determinado volume de ar é imperfeita. Exige-se, assim, a escolha criteriosa das fronteiras do espaço a analisar de modo a garantir a homogeneidade da mistura para minimizar o erro inerente na medição, e consequentemente no respectivo cálculo dessa taxa. Nestes espaços, ou edifícios, pode-se assumir uma única ou várias zonas consoante o nível de uniformidade na distribuição do gás traçador.

A metodologia mais simples é a do espaço unizona¹⁹, na qual se podem enquadrar os espaços residenciais ou outros espaços abertos (Liddament, 1986). Nos espaços multizona verifica-se a inibição dos escoamentos interiores, ou pelo menos uma forte impedância, devido à compartimentação do espaço e às ligações internas que originam assimetrias na distribuição da massa do gás no volume do sistema. Na prática, a delimitação das fronteiras do sistema é difícil devido ao carácter aleatório dos escoamentos (Amaral, 2008 e Bekö *et al.*, 2010). Nos espaços residenciais ocupados regularmente existe a inviabilidade prática do recurso a ventiladores para uma homogeneização prévia à medição da mistura do gás traçador no volume de ar e a dificuldade de controlo da manobra dos vãos exteriores (Montoya *et al.*, 2011), acrescidas do facto de a emissão pontual no espaço do CO₂ metabólico e a alteração imprevisível das actividades humanas e metabólicas gerarem desequilíbrios na distribuição das concentrações.

Nos estudos de Stavova (Barankova) *et al.* (s/data e 2007), as taxas de renovação são bastante influenciadas pela posição das portas de ligação interiores e pelo grau de abertura de quaisquer janelas ou portas. São muito diminutas e inter-diferenciadas quando os espaços estão fechados aumentado homogeneamente e proporcionalmente com o ângulo de abertura das portas de ligação interiores e, ou, com a abertura simultânea dos vãos exteriores. A posição de abertura das portas interiores tem também influência na mistura do CO₂,

¹⁹ Os modelos ou espaços unizona são aqueles que não apresentam grande resistência aos escoamentos internos, em que se assume ou verifica uma distribuição uniforme da massa, se encontram a uma pressão e temperatura uniforme e os efeitos de momento são nulos ou baixos, ou seja, não existem sistemas mecânicos de ventilação em operação, nem escoamentos naturais de grande magnitude ou turbulentos, apenas caudais de infiltração baixos e laminares (Liddament, 1986 e Montoya *et al.*, 2011). São tipicamente espaços com menos de 500m³ (Liddament, 1996).

potenciando a estratificação horizontal das concentrações quando os espaços estão fechados. Na moradia do estudo de Wallace *et al.* (2002) também se verifica a estratificação vertical das concentrações de CO₂, devido a grandes diferenças assimétricas das temperaturas interiores que no Inverno por “efeito de chaminé” potenciam maiores concentrações nos pisos superiores mais aquecidos.

No entanto, a utilização do CO₂ metabólico possui a vantagem de ser um gás gratuito, porque naturalmente presente no ar (Stavova *et al.*, 2007; Naydenov *et al.*, 2007; Montoya *et al.* 2011), e de ter uma densidade adequada para uma boa mistura²⁰ (Barankova *et al.*, 2004 e Mahyuddin e Awbi, 2010), para além da sua utilidade como indicador químico da QAI. Em cada espaço não compartimentado pode-se medir a variabilidade espacial das concentrações em vários pontos e aferi-la em relação à concentração de equilíbrio ou à concentração média (Persily, 1997, Naydenov *et al.*, 2007 e Montoya *et al.*, 2011). Se o desvio padrão do erro da concentração for conhecido, o erro na taxa de renovação, ou o intervalo de confiança, também podem ser calculados (ISO 12569).

Em Barankova *et al.* (2004), com um modelo unizona, as diferenças das concentrações obtidas em relação ao valor médio são inferiores a 50ppm, o que representa um desvio percentual médio menor que 3% sem recurso a ventiladores previamente. Mais, como o efeito das plumas térmicas dos aquecedores ligados é semelhante à acção dos ventiladores nos ensaios convencionais, verificam-se também, neste estudo, diferenças máximas em relação aos valores médios inferiores a 30ppm. Em Stavova *et al.* (2007), a estratificação horizontal das concentrações verificada nos compartimentos quando fechados sugere a constituição de espaços unizona por cada compartimento individualizado. Mas a inesperada homogeneização da mistura, quando as portas interiores se encontram abertas e os compartimentos ligados, já permite um espaço unizona aplicado a todo o volume da habitação. Quando se utilizam os quartos de dormir, ou qualquer outro espaço individualizado, como espaços unizona, torna-se evidente que as concentrações de CO₂ em cada espaço analisado não são apenas determinadas em função das concentrações exteriores infiltradas, das concentrações interiores exfiltradas e da geração interior.

Aliás, as concentrações de CO₂ nos espaços unizona individualizados só podem ser associadas às trocas de ar com o exterior se ignorando os escoamentos com outras zonas

²⁰ Em condições normais de temperatura e pressão (segundo o NIST, 20 ° C (293,15 K) e uma pressão absoluta de 101,325 kPa), a densidade do CO₂ é cerca de 1,98 kg/m³, cerca de 1,5 vezes a do ar (http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_dioxide acedido em 11-05-2011).

interiores - pressuposto dificilmente defensável em edifícios ventilados naturalmente -, o que pode originar um erro de cerca de 40% (Bekö *et al.*, 2010). Uma das razões para esta inexactidão deve-se à incerteza associada à variação das concentrações de CO₂ por infiltração interior que têm mais influência do que a variação das concentrações iniciais de CO₂ exterior (desvio padrão de 40ppm) utilizadas no cálculo das taxas de renovação dos quartos de dormir no estudo de Bekö *et al.* (2010); a outra razão relaciona-se com a magnitude e a direcção dos caudais de infiltração interiores.

Bekö *et al.* (2010) fazem, por simulação, a estimação do erro relativo ao desconhecimento das concentrações interiores de CO₂ nas restantes zonas configurando diversos cenários para os escoamentos entre as zonas adjacentes e o quarto unizona em avaliação. No entanto estes escoamentos simulados são quase todos unidireccionais. Mas Bulinska (2007) assume, no seu modelo multizona residencial, a bidireccionalidade dos fluxos entre o exterior e o interior e entre as diversas zonas interiores conectadas com o modelo.

No sector residencial as fontes de mistura podem ser a difusão natural e a interacção do gás com os escoamentos de infiltração e as plumas térmicas²¹ (Barankova *et al.*, 2004). No estudo experimental laboratorial de Barankova *et al.* (2004), as maiores concentrações verificam-se em cima do manequim utilizado na respectiva zona de respiração e nos fluxos de convecção térmica do sistema de aquecimento e as menores concentrações verificam-se nos cantos e junto às aberturas de admissão de ar, grelhas ou janelas. Estes são pontos de medição a evitar, bem como outros pontos críticos muito junto ao pavimento, tecto, paredes ou espaços entre o mobiliário (Naydenov *et al.*, 2007; Asadi *et al.*, 2011).

Nas modelações CFD²² efectuadas por Bulinska (2010) para investigar a distribuição das concentrações de CO₂ metabólico e testar a boa posição dos sensores confirmam-se os resultados de Barankova *et al.* (2004): as maiores concentrações verificam-se junto à zona de respiração do ocupante e junto à janela, devido à posição excêntrica do ocupante, perto desta, e as menores junto ao chão e às zonas de exfiltração, junto à frincha inferior da porta interior. Atesta-se, igualmente, a importância dos fluxos convectivos ascendentes gerados pelo aparelho de aquecimento para a boa mistura do CO₂ metabólico, embora os caudais frios das infiltrações exteriores façam diminuir a velocidade do ar no quarto e prejudiquem o bom

²¹ As plumas térmicas são escoamentos de convecção originados por gases quentes ascendentes, que serão verticais se não se verificarem fluxos de ar “cruzados”.

²² Nesta simulação utilizaram-se dados obtidos em medições de campo num quarto de dormir durante a noite, em dois pontos de medição, um interior e outro exterior, para o estabelecimento das condições iniciais e de fronteira da modelação numérica; o quarto foi fortemente ventilado previamente à medição para garantir uma concentração interior inicial nula de CO₂.

efeito das plumas térmicas na homogeneidade da mistura. No entanto, a configuração e características da janela exterior e a geometria do espaço também são fundamentais para os resultados específicos obtidos, como serão também o mobiliário existente, o nível acima do solo do pavimento, as condições climatéricas exteriores de vento e temperatura e eventualmente a radiação solar transmitida (Naydenov *et al.*, 2007).

Os pontos de medição devem ser representativos de todo o espaço ou volume da zona (Barankova *et al.*, 2004) e, quando se utiliza um único, este deve-se posicionar na zona de concentração média (Bulinska, 2010). Em Montoya *et al.* (2011), faz-se um teste de verificação da uniformidade da distribuição do CO₂ metabólico que consiste na medição das concentrações em diversos pontos, considerando que os pontos onde se verifica uma mistura homogénea são aqueles onde as diferenças entre as concentrações medidas e a concentração média obtida são inferiores a 10%. Quando verificada essa uniformidade, as medições são efectuadas num único ponto.

No estudo de campo de Naydenov *et al.* (2007), discorre-se igualmente sobre o posicionamento dos pontos de medição representativos; o objectivo é criar uma regra de boa prática aplicável às medições de campo. Analisam-se os resultados em cada ponto de medição face às diferenças em relação à concentração média e observa-se a contribuição significativa dos pontos críticos ou não representativos para as diferenças máximas verificadas. As medições em mais de uma centena de pontos permitem concluir, neste caso, sobre uma posição representativa centrada no espaço a uma altura entre 0.4m e 1.0m, afastado de um raio mínimo de 1.8m a partir do ponto de geração do ocupante a dormir e da influência dos escoamentos entre portas e janelas, e das plumas térmicas produzidas pelos radiadores ou outros escoamentos não laminares.

Os resultados demonstram uma distribuição suficientemente uniforme nos períodos de decaimento diurnos, sendo possível efectuar as medições a partir de um único ponto. À noite, em condições de ocupação regular dos espaços, é necessária uma selecção mais criteriosa das posições representativas, evitando as posições críticas já referidas.

1.3 Objectivos

O objectivo deste estudo é a obtenção de dados experimentais de campo que permitam a avaliação das taxas reais de renovação do ar por infiltração, em condições de ventilação natural, nos edifícios residenciais existentes sob ocupação e utilização regulares. Utiliza-se o

método dos gases traçadores, através da técnica do decaimento das concentrações e da técnica da emissão constante do CO₂ metabólico como gás traçador. Através deste objectivo principal, cumprem-se os objectivos subsidiários da comparação das taxas de infiltração obtidas com as taxas estimadas de acordo com as metodologias preconizadas no actual RCCTE e no seu projecto de revisão, bem como a avaliação de alguns parâmetros indicadores da QAI, através dos caudais de ar novo obtidos e das concentrações máximas de CO₂ registadas e das de equilíbrio de referência estimadas para a ocupação máxima em cada habitação. Pretende-se igualmente discutir as condições de aplicação de soluções inovadoras de ventilação natural controlada baseadas em critérios exigenciais definidos pelos ocupantes residenciais.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação tem cinco capítulos no total.

Neste capítulo introdutório apresentaram-se o enquadramento e a motivação, o objectivo da tese e a revisão literária do estado do conhecimento actual, de modo a enquadrar os pressupostos e as condições da investigação.

No segundo capítulo apresenta-se a fundamentação teórica do método dos gases traçadores e das técnicas utilizadas com os parâmetros e as expressões de cálculo associadas, uma síntese das respectivas vantagens e desvantagens, e a metodologia adoptada: i) descrevem-se os instrumentos de monitorização do CO₂ metabólico; ii) apresenta-se o processo de tratamento dos dados monitorizados; iii) apresenta-se a metodologia de estimação das taxas de renovação do ar interior do actual RCCTE e do seu projecto de revisão.

No terceiro capítulo descrevem-se e caracterizam-se as habitações estudadas, também apresentadas em peças desenhadas em Anexo, e apresentam-se os resultados das taxas de infiltração obtidas, a estimação das taxas regulamentares, os caudais de ar novo obtidos e estimados, e faz-se a avaliação das concentrações de CO₂, registadas e estimadas, e da HR, como indicadores da QAI, e da temperatura do ar e HR, como indicadores de conforto higrotérmico. Neste capítulo, serão também interpretados e discutidos os resultados, confrontando-os com a literatura consultada.

No capítulo final apresentam-se as conclusões e fazem-se sugestões para a investigação futura.

2 MÉTODO E METODOLOGIA

2.1 Fundamentação teórica do método dos gases traçadores

O método dos gases traçadores²³ é uma ferramenta usual na quantificação da ventilação, ou seja, podem-se avaliar as trocas totais de ar de um espaço com a(s) sua(s) envolvente(s), através da “marcação” do ar por injeção ou geração de um gás de fácil identificação, registando a evolução temporal da sua concentração. Estes fluxos dizem respeito aos caudais de ar entre um espaço e o exterior, através da sua envolvente exterior, ou entre as diversas zonas de um edifício e destas com o exterior, utilizando um ou mais gases traçadores, consoante o número de zonas, para a determinação da matriz dos escoamentos, dos caudais totais envolvidos ou das taxas de renovação.

O presente estudo será dirigido para a avaliação das taxas de infiltração e exfiltração, por ventilação natural em espaços residenciais unizona^{(*) = (19)}, sob condições de ocupação regular. Um espaço unizona é aquele onde se medem os caudais de ar ou as taxas de renovações que se estabelecem exclusivamente com o exterior (ISO 12569, 2010). Os espaços unizona ideais devem ter, ainda, as seguintes características (Sherman, 1990; ISO 12569, 2010): i) homogeneidade, que significa que a densidade e a concentração do gás traçador devem ser semelhantes em qualquer ponto da zona; ii) mistura perfeita, que implica que os caudais de ar exterior e os caudais de gás injectado, ou produzido internamente, se dispersem homogeneamente e instantaneamente ou num espaço de tempo bastante diminuto; iii) não devem existir escoamentos turbulentos na zona, designadamente caudais de ventilação cruzada que promovam a não uniformidade e a variabilidade das concentrações no tempo. A ISO 12569 (2010) estabelece a necessidade da uniformidade da distribuição espacial das concentrações do gás traçador no ar do volume de controlo em análise como condição fundamental e indispensável para a aplicação do método dos gases traçadores em espaços unizona.

O método dos gases traçadores baseia-se no princípio da conservação da massa do gás traçador e do ar, que se consideram incompressíveis. As técnicas usadas são: i) a técnica do decaimento da concentração; ii) a técnica da emissão constante; iii) a técnica da concentração constante²⁴(Figura 1).

²³ Também designado de método da diluição do gás traçador

²⁴ A evolução da concentração do gás traçador encontra-se estabilizada no tempo, ou seja, em regime permanente ou estacionário. Inversamente, nas técnicas de regime transiente as concentrações do gás traçador variam no tempo, independentemente da uniformidade da sua distribuição espacial.

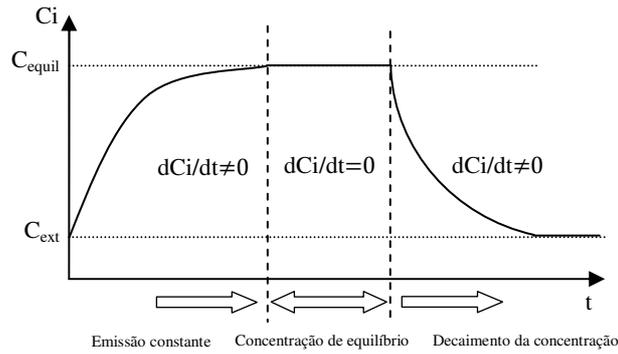


Figura 1 - Evolução típica das concentrações, C_i , do gás traçador no tempo, t : com injeção ou geração do gás traçador na fase inicial; na ausência de injeção ou geração na fase final.

A relação entre a taxa de renovação horária, λ , e o caudal volúmico de ventilação é expressa pelo quociente do caudal volúmico (Q em $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) pelo volume de ar efectivo (V em m^3) do espaço unizona em avaliação:

$$\lambda = Q/V \text{ [h}^{-1}\text{]} \quad (1)$$

O balanço da concentração mássica de um poluente em cada instante no espaço (volume de controlo) de uma unizona ventilada naturalmente (Figura 2), considerando a absorção ou deposição nos materiais e superfícies, é traduzido pela equação diferencial (Gameiro da Silva *et al.*, 2009 e 2011):

$$V \frac{dC_i}{dt} = G + Q C_{\text{ext}} - Q C_{i(t)} - v_d S \text{ [mg} \cdot \text{h}^{-1}\text{]} \quad (2)$$

em que: i) G é a taxa de geração ou emissão do gás traçador no espaço em $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$; ii) Q é o valor do caudal volúmico de ventilação no espaço em avaliação em $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; iii) $C_{i(t)}$ é a concentração interior instantânea do gás traçador em cada momento em $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; iv) C_{ext} é a concentração do gás no ar exterior em $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; v) v_d é a taxa de absorção ou de deposição do gás em superfícies e materiais em $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$; vi) S é a área da superfície de sedimentação em m^2 ; vii) V é o volume efectivo da zona em m^3 .

A concentração exterior do gás traçador que se assume constante²⁵ é, apenas, relevante quando este é um dos gases constituintes do ar. As concentrações do gás devem ser expressas

²⁵ Assume-se que a magnitude da concentração de CO_2 exterior é equivalente à concentração mínima registada de CO_2 interior durante o período de monitorização, pois esta é a concentração permanente após a total renovação do ar interior por exfiltração e infiltração de ar novo.

em $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ para evitar a utilização da equação do balanço mássico como uma equação de balanço volúmico (Roulet citado por Sherman, 1990)²⁶.

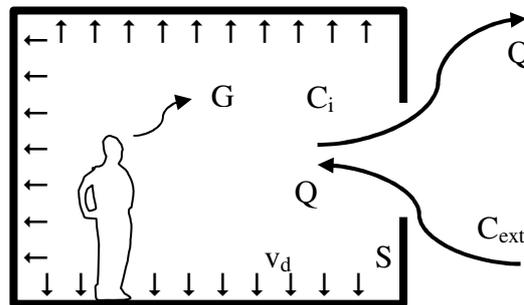


Figura 2 - Representação gráfica do balanço das concentrações de um gás traçador presente no ar atmosférico com geração interna (ou injeção) e deposição nas superfícies e materiais (adaptado de Moret Rodrigues *et al.*, 2009)

Considerando desprezível o caudal mássico absorvido ou depositado nas superfícies ou materiais, ou reduzindo a taxa de geração ou injeção G para ter em conta o seu valor, no interior (Gameiro da Silva *et al.*, 2011), verifica-se que o caudal mássico total do gás traçador em cada momento é dado pela soma do caudal de gás gerado ou injectado no interior com o caudal de gás infiltrado, subtraída do caudal exfiltrado, o que é expresso na seguinte equação de conservação da massa:

$$\dot{m}_{\text{total}} = \dot{m}_{\text{gerado/injectado no interior}} + \dot{m}_{\text{que entra}} - \dot{m}_{\text{que sai}} \quad [\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}] \quad (3)$$

Quando a concentração do gás traçador estabiliza, a massa do gás que se introduz na zona iguala a massa que sai da zona e obtém-se a partir da equação do balanço mássico (2) um caudal de infiltração que depende da taxa de geração ou injeção do gás traçador e da concentração (uniforme e constante) do gás no local. Nesta relação, o valor da concentração de equilíbrio interior é relevante, sobretudo, para a estimação dos caudais de ventilação requeridos por exigências de QAI e de conforto higrométrico²⁷ (Moret Rodrigues *et al.*, 2009):

$$\dot{Q} = \frac{\dot{G}}{C_{\text{equi}} - C_{\text{ext}}} \quad \text{ou} \quad \dot{Q} = \frac{\dot{W}}{\rho W_{\text{equi}} - \rho W_{\text{ext}}} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}] \quad (4)$$

²⁶ A conversão da concentração volúmica em concentração mássica expressa em condições de temperatura e pressão normais^(*) = ⁽²⁰⁾, faz-se através da expressão $\text{ppmv} = 24.04 \cdot m/\text{massa molecular do gás}$ em que m é a concentração mássica do gás no sistema em $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Liddament, 1996). No caso do CO_2 , teremos $\text{ppmv} = 1.8 \cdot m$.

²⁷ Nesta situação, o vapor de água assume um papel idêntico ao do gás traçador.

em que: i) C_{equi} é a concentração de equilíbrio da carga poluente em mg.m^{-3} ; ii) W é a taxa de produção interior de vapor em g.h^{-1} ; iii) $\rho_{w_{\text{equi}}}$ e $\rho_{w_{\text{ext}}}$, a concentração de vapor (humidade absoluta) de equilíbrio no interior e no exterior, respectivamente, em g.m^{-3} .

A escolha da técnica a utilizar faz-se consoante o objectivo da medição, de forma a minimizar o erro pelo cálculo indirecto da variável dependente devido à incerteza na determinação do volume efectivo dos espaços existentes, ocupados e mobilados (Amaral, 2008), dos caudais associados à taxa de geração no caso do CO_2 metabólico como gás traçador, e das concentrações de CO_2 no ambiente exterior. Esta escolha deve atender também à estrutura do edifício, ao sistema de ventilação e à instrumentação de medição a utilizar (ISO 12569)²⁸.

Em regime transiente, a técnica da emissão constante implica o conhecimento da taxa de geração ou de injeção do gás traçador. Porém, é difícil conhecer esta taxa com a utilização do CO_2 metabólico devido à variabilidade deste caudal nos espaços residenciais. Por isso é também difícil atingir as condições de regime permanente, para além da abertura frequente de portas ou janelas exteriores. No contexto de espaços de ambiente não controlado com ocupação humana, a técnica do decaimento das concentrações apresenta-se como a técnica mais adequada, visto que permite o cálculo directo da taxa de infiltrações natural, ou a constante do tempo nominal²⁹, após a ausência dos residentes (Gameiro da Silva *et al.*, 2011). Por outro lado, a técnica do decaimento requer tempos de medição mais curtos de apenas algumas horas, enquanto as restantes técnicas podem exigir a monitorização das concentrações durante vários dias ou semanas.

Com a utilização do CO_2 metabólico é necessária especial atenção à localização dos instrumentos de detecção, aos tempos de monitorização, ao número de testes, à homogeneidade das concentrações, bem como à abordagem analítica do cálculo das taxas de renovação do ar interior.

2.2 Caracterização dos gases traçadores

Um elemento traçador é um material ou um fluido facilmente detectável que adicionado a outras substâncias, para facilitar a sua difusão e transporte, permite a sua monitorização no tempo e no espaço. Assim, com um gás traçador, é possível determinar as taxas de trocas de ar num espaço ou entre espaços.

²⁸ A norma não faz referência à determinação da incerteza mas apenas à estimação do erro.

²⁹ A constante do tempo nominal é definida como sendo a idade do ar que é o conceito inverso da taxa de renovação do ar.

O gás traçador ideal caracteriza-se, sobretudo, pela sua segurança, reactividade e mensurabilidade (Sherman, 1990): i) a segurança diz respeito à ausência de perigo ou de toxicidade para a saúde dos seres vivos ou para o meio ambiente, sendo assim não inflamável, não explosivo, não alergénico e ambientalmente inerte ou degradável; ii) a reactividade significa que o gás traçador deve ser inerte, ou seja, que não deve sofrer decomposição ou reacção química ou física com o ar, ou com os materiais da envolvente do sistema em estudo, para que, além das questões de segurança referidas, se verifique a conservação da sua massa no tempo; iii) a mensurabilidade implica que o gás traçador seja facilmente detectável e quantificável a baixas concentrações, por qualquer instrumento de medição adequado.

Um gás traçador ideal deve apresentar ainda outras características ou requisitos adicionais relevantes (Amaral, 2008; Santos, 2008; Sherman, 1990): i) a insensibilidade, isto é, o gás traçador não deve afectar os escoamentos ou a densidade do ar, de modo a promover a sua dispersão no espaço, devendo ter uma massa molecular semelhante à massa molecular média do ar³⁰; ii) a singularidade, que significa que este deve ser distinto dos outros componentes do ar atmosférico para facilitar o seu reconhecimento; iii) não deve ser absorvido pelos materiais e pelas superfícies do sistema em estudo; iv) deve ser inodoro, incolor e insípido; v) não deve ser dispendioso e a instrumentação exigível para a sua detecção deve ser acessível.

É facilmente dedutível a dificuldade de selecção de um gás que reúna todas as características e requisitos do gás traçador ideal. No entanto, segundo Sherman (1990), os gases muito leves ou muito pesados são os que apresentam os comportamentos mais anómalos quando comparados com outros gases, com implicações nos resultados inferidos.

2.3 O CO₂ metabólico como gás traçador

Relativamente a outros gases traçadores, o CO₂ apresenta as vantagens de: i) não ser inflamável, explosivo, ou prejudicial para a saúde até concentrações bastante elevadas, geralmente não atingíveis com o CO₂ metabólico em espaços residenciais³¹; ii) ser incolor e inodoro; iii) ser um gás cuja componente antropogénica é ambientalmente inócua, pois esta não constitui a fonte principal da sua contribuição para o efeito de estufa; iv) ser um gás inerte e detectável a muito baixas concentrações com instrumentos baratos e de fácil aquisição; v)

³⁰ A massa molecular do ar é de aproximadamente 29 g. mol⁻¹ considerando que a composição média do ar atmosférico é de 78,08% de N₂ (nitrogénio), 20,94% de O₂ (oxigénio) e de 0,93% de Ar (árgon), (em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Ar> em 17-06-2011). A massa molecular do CO₂ é de 44 g. mol⁻¹, o que representa uma densidade de 1,5 vezes a densidade do ar, nas condições referidas na nota 20.

³¹ O limite máximo estabelecido no actual RSECE é de 1000ppm ou 1800 mg.m⁻³; no entanto, admitem-se exposições a concentrações superiores em função do tempo de exposição, até ao limite de 5000ppm, sem prejuízo para a saúde.

ter uma densidade muito próxima da do ar atmosférico; vi) e, sobretudo, ser gratuito na sua forma metabólica.

Possui, no entanto, as desvantagens de: i) ser absorvível por alguns materiais construtivos, tais como placas de gesso cartonado ou de derivados de madeira, embora em percentagens reduzidas (Santos, 2008), ou ainda por determinados materiais em processo de endurecimento, como o cimento ou a cal aérea; ii) ser um dos constituintes do ar atmosférico, o que implica ter em consideração a sua concentração exterior, nunca nula, na equação do balanço mássico e a estimação do erro devido à sua eventual variabilidade durante o tempo de medição; iii) ser, na sua forma metabólica, gerado pelos ocupantes de cada espaço, o que dificulta a homogeneidade das concentrações, devido à incompatibilidade do recurso a ventiladores com a ocupação dos espaços, e devido à variabilidade da actividade metabólica e ocupacional de cada residente, e da utilização dos espaços pelos diversos residentes (Figura 3).

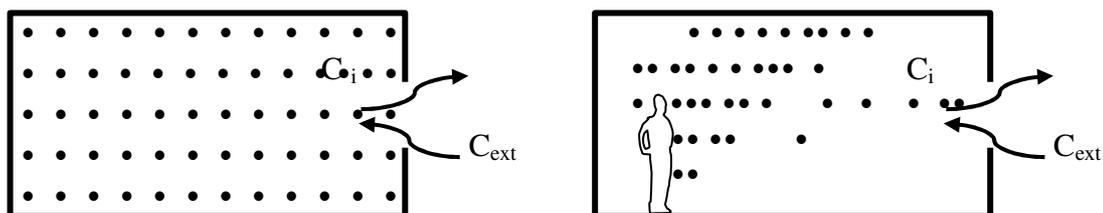


Figura 3 – Distribuição espacial das concentrações em espaço unizona: uniforme à esquerda; não uniforme inicial resultante de uma fonte emissora pontual à direita.

Porém, este último aspecto é também o principal motivo da utilização do CO₂ metabólico como gás traçador, pois permite avaliar as taxas de ventilação em espaços sob condições de utilização corrente e onde a ocupação humana é determinante para o estabelecimento das exigências de ventilação, como em habitações.

A taxa de geração do CO₂ metabólico é dada pela expressão (Naydenov *et al.*, 2007; Gameiro da Silva, 2009; Emmerich e Persily, 2001, citados por Gameiro da Silva *et al.*, 2011):

$$\dot{Q}_{CO_2} = RQ \cdot \dot{Q}_{O_2} \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]} \quad (5)$$

em que RQ é o quociente respiratório, ou seja, o volume de CO₂ produzido sobre o volume de O₂ consumido, cujo valor típico é 0.83 para uma actividade metabólica moderada, mas que

pode variar até 1, nos casos de actividade metabólica muito elevada, superior a 5 met³². A taxa de geração de O₂ calcula-se pela expressão:

$$\dot{Q}_{O_2} = \frac{2,76 \cdot A_D \cdot M}{0,23 \cdot RQ + 0,77} \cdot 10^{-6} [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6)$$

em que: i) M é o nível de actividade em met; ii) A_D é a área de Dubois, que permite o cálculo da área total da superfície corporal:

$$A_D = 0,203 \cdot (H^{0,725}) \cdot (W^{0,425}) [\text{m}^2] \quad (7)$$

em que: i) H é a altura em m; ii) W o peso em kg de cada ocupante.

A taxa de geração de CO₂, em (2) e (4), pode ser estimada pela seguinte expressão:

$$\dot{G}_{CO_2} = \left[RQ \frac{2,76 \cdot A_D \cdot M}{0,23 \cdot RQ + 0,77} \cdot 3,6 \cdot 10^3 \right] \cdot 1,98 [\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (8)$$

em que 1,98 kg.m⁻³ é a massa específica do CO₂ gasoso à temperatura de 25°C.

Os ocupantes da amostra do estudo de campo poderão ter taxas de produção de CO₂ metabólico muito diversas. A tabela 1 apresenta os caudais mássicos de geração de CO₂ de cada ocupante como em (8) para níveis de actividade metabólica distintos.

Tabela 1 - Características e taxas de emissão de CO₂ de alguns ocupantes da amostra

	Ocup. (#)	A (m)	P (kg)	A _D (m ²)	RQ	GCO ₂ (mg/h)				
						Met=0.8	Met=1	Met=1.6	Met=2.5	Met=3
Máximo peso	3	1.75	95	2.11	0.83	28681	35852	57362	89629	107555
Percentil 50 ⁽¹⁾	4	1.76	67 ⁽³⁾	1.83	0.83	24828	31035	49656	77587	93105
Mínimos	9	1.50	51	1.45	0.83	19690	24613	39380	61531	73838
Máxima altura	10	1.85	87	2.12	0.83	28765	35956	57529	89889	107867
Máxima A _D	18	1.80	94	2.14	0.83	29142	36427	58283	91068	109281
Percentil 50 ⁽¹⁾⁽²⁾	40	1.68	73 ⁽³⁾	1.83	0.83	24896	31120	49791	77799	93359
Percentil 50 ⁽¹⁾⁽²⁾	45	1.68	73 ⁽³⁾	1.83	0.83	24896	31120	49791	77799	93359

Notas: (1) Em relação à taxa de geração metabólica de CO₂ nos adultos; (2) Em relação à altura nos adultos; (3) O percentil 50 corresponde a 70kg nos adultos; Met [0.8;1.0] = repouso; Met [1.0;1.6] = trabalho leve a moderado; Met [1.6;3.0] = trabalho moderado a forte.

Legenda: H= habitação; Ocup= Ocupante; A= Altura; P= Peso; AD= Área de Dubois; RQ= Coeficiente respiratório; GCO₂= Caudal mássico de geração de CO₂ dos ocupantes; Met= Unidade de medida do metabolismo em condições de conforto térmico.

A A_D de referência para os adultos é de 1,8m², que corresponde a uma altura e peso de 1,7m e 70kg, respectivamente, considerado o percentil 50 europeu (Gameiro da Silva, 2009). A taxa

³² É uma unidade de medida do metabolismo, equivalente a 58,15 W/ m² de área de superfície corporal.

de geração de CO₂ de referência nos adultos para uma actividade metabólica de referência de 1.2 met (69.78W.m⁻²) é de 37000mg.h⁻¹.

É evidente a dificuldade em determinar a taxa de produção de CO₂ metabólico através de formulações analíticas³³. Às fontes de geração humana acrescentam outras fontes de produção de CO₂, como os processos de combustão a partir de combustíveis fósseis³⁴, os processos de combustão emlareiras e os processos metabólicos de plantas e animais de estimação.

2.4 Princípio de detecção e medição do gás traçador

O princípio básico dos instrumentos de medição do CO₂ é o da espectroscopia³⁵ de absorção da radiação infra-vermelha (IV). Este método baseia-se na propriedade de absorção da radiação IV (0,78 a 1000µm) que diversos gases possuem. Cada um desses gases absorve esta energia numa determinada gama específica de comprimentos de onda do espectro IV, mas cuja absorvância é variável nesse “intervalo”. A energia IV é absorvida quando os átomos das moléculas do gás entram em frequência de ressonância com as frequências da radiação electromagnética, aumentando o nível energético vibracional das moléculas. O aumento da temperatura resultante deste fenómeno é proporcional à concentração de gás analisado e inversamente correlacionada com a diminuição da força da fonte de radiação electromagnética (REHVA Guidebook 14, 2011). O CO₂ absorve radiação electromagnética na gama dos comprimentos de onda da região térmica dos IV muito centrados nos 4,26µm, mas também da região dos infravermelhos próximos (0,78 a 3 µm³⁶), e absorve mais energia electromagnética do que a maioria dos gases. É a razão por que este método é muito usual na detecção das concentrações de CO₂ que, assim, exige instrumentos de fácil utilização relativamente fiáveis e baratos.

Os instrumentos utilizados neste trabalho são espectrofotómetros não-dispersivos do IV próximo (NDIR). Os analisadores funcionarão em monitorização contínua efectuando medições discretas. Os sensores NDIR são constituídos essencialmente por: i) uma lâmpada de luz; ii) uma ou duas câmaras de medição, uma para a amostra de ar e a outra,

³³ O método analítico serve para resolver problemas simples de Engenharia através de formulações gerais da realidade baseadas em equações e modelos matemáticos. Neste método a resolução de equações diferenciais implica sempre simplificações.

³⁴ A produção de CO₂ é de 27x10⁻⁶ m³/s/kW (19,2x10⁴ mg/h/kW) para o gás natural e de 33x10⁻⁶ m³/s/kW (23,5x10⁴ mg/h/kW) para o GPL (Moret Rodrigues *et al.*, 2009).

³⁵ Conjunto de técnicas para análise de substâncias, baseados na produção e interpretação dos seus espectros de emissão, absorção ou dispersão de radiações electromagnéticas (em <http://bemfalar.com/significado/espectroscopia.html> acedido em 03-07-2011), usadas para identificar um composto ou investigar a composição de uma amostra (em http://pt.wikipedia.org/wiki/Espectroscopia_de_infravermelho acedido em 03-07-2011).

³⁶ ISO 20473:2007 (<http://en.wikipedia.org/wiki/Infrared> acedido em 02-05-2013).

eventualmente, para o gás padrão a analisar; iii) um ou dois filtros ópticos, selectivos da radiação específica dos IV próximos; vi) e um ou dois detectores da energia radiativa, conforme o número de câmaras de medição; v) conversores de sinal em concentração de gás.

A amostra recolhida na câmara óptica é sujeita às frequências de energia IV referidas. Na outra extremidade da câmara, oposta à da lâmpada, encontra-se o detector que mede o efeito da energia radiativa absorvida pelo CO₂, ou seja, mede a redução da intensidade da radiação de determinados comprimentos de onda que atravessam os filtros. O filtro/detector está ajustado para as frequências de onda absorvíveis pelo CO₂, gerando um sinal relacionado com o montante de partículas deste gás que é proporcional à sua concentração. Cada filtro elimina todas as outras frequências, para as quais não está ajustado, e assume-se que não existem quaisquer outras partículas da amostra com frequências de ressonância idênticas às das moléculas de CO₂. Finalmente, os detectores convertem a energia de radiação térmica num valor de tensão eléctrica, a partir do qual se determina a concentração do gás. Como a mudança de temperatura influencia a sensibilidade dos detectores é necessário um sensor de temperatura que faça a compensação do sinal térmico. Exige-se, igualmente, a compensação da variação de pressão porque influencia a concentração de moléculas por unidade de volume. O sistema de medição pode compreender ainda o armazenador de dados (*data logger*) de cada sensor. O material das câmaras de medição ou filtros deve ser não absorvente, não-reactivo e não-difusivo do gás em análise (o gás não reage directamente com o detector).

Idealmente dever-se-iam monitorizar também as condições ambientais exteriores pelo efeito que podem ter sobre os caudais de infiltração, nomeadamente usando estações meteorológicas para o registo da temperatura exterior e da velocidade e direcção do vento, havendo o cuidado de sincronizar os relógios dos vários sistemas de registo de dados (ISO 12569).

2.4.1 Instrumentos de medição utilizados no estudo de campo

As medições da concentração de CO₂, temperatura do ar interior e humidade relativa (HR) realizaram-se com o espectrofotómetro e *data logger* Extech SD800 configurado para recolher valores de minuto a minuto. A compensação da altitude é feita para cada medição, a partir do valor desta grandeza arredondada à centena inteira mais próxima. Este sensor NDIR tem uma gama de medição de 0 a 4000 ppm, com uma resolução de 1ppm e uma incerteza de medição de ± 40 ppm para concentrações menores ou iguais a 1000ppm, e de $\pm 5\%$ para valores de 1000ppm a 3000ppm. O sensor de temperatura tem uma gama de medição entre 0 e 50°C,

com uma resolução de 0,1°C e uma incerteza de ±0.8°C. O sensor de HR tem uma gama de medição de 10 a 90% com uma resolução de 0,1% e uma incerteza de ±4%HR para valores entre 10 e 70%HR, e de ±(4% do valor lido + 1%HR) entre 70 e 90%HR.

O levantamento dimensional das habitações foi realizado com um medidor laser de distâncias Bosch PLR30, com uma gama de medição entre 0,2 e 30m com uma incerteza de ±20mm.

2.5 Técnica do decaimento das concentrações com o CO₂ metabólico

Nesta técnica regista-se o decaimento das concentrações, após a interrupção da geração interior do CO₂ metabólico, para a obtenção directa das taxas de infiltração.

Resolvendo a equação diferencial (2), utilizando o quociente (1) e o princípio estabelecido em (3) mas eliminando o termo relativo à geração inexistente do gás traçador inexistente nesta técnica (Ekberg e Kraenzmer, 1998), teremos:

$$\frac{dC_i}{dt} = -\lambda (C_{i(t)} - C_{ext}) \text{ [mg.m}^{-3}\text{.h}^{-1}\text{]} \quad (9)$$

A solução desta equação diferencial, com C_{ext} e Q constantes, no intervalo de tempo definido pelo instante inicial t_0 para a concentração inicial C_0 , e pelo instante final t para a concentração $C_{i(t)}$, obtém-se pela expressão:

$$C_{i(t)} - C_{ext} = (C_{(0)} - C_{ext}) \cdot e^{-\lambda (t-t_0)} \text{ [-]} \quad (10)$$

De modo equivalente, aplicando logaritmos naturais à equação (10):

$$\ln \left(\frac{C_{(t)} - C_{ext}}{C_{(0)} - C_{ext}} \right) = -\lambda (t-t_0) \text{ [-]} \quad (11)$$

A equação (11) também pode ser expressa como uma equação linear sob a forma $y = mx+c$:

$$\ln (C_{(t)} - C_{ext}) = -\lambda (t-t_0) + \ln (C_{(0)} - C_{ext}) \text{ [-]} \quad (12)$$

Assim, se for efectuada uma regressão linear, a taxa de infiltração é o módulo do declive da recta obtida por regressão linear pelo método dos mínimos quadrados (Gameiro da Silva *et al.*, 2011). Representando o logaritmo da concentração *versus* tempo é possível avaliar a

precisão do ensaio mediante o ajuste da função linear³⁷, mas deve-se garantir em cada ensaio que a diferença da concentração do gás traçador entre o momento inicial e o momento final seja suficientemente maior do que a da incerteza de medição do sensor (ISO 12569, 2010).

2.5.1 Tratamento de dados na técnica do decaimento das concentrações

Para a determinação da taxa de renovação do ar por infiltração pelo método do decaimento da concentração, procede-se à justaposição no Microsoft Excel[®], ou num *software* de tratamento de dados similar, da linha de tendência com uma expressão exponencial sobre os dados experimentais, reduzidos da concentração de CO₂ exterior estimada e afere-se a correlação dos dados experimentais com a curva da função exponencial através de um processo de regressão linear (Figura 4).

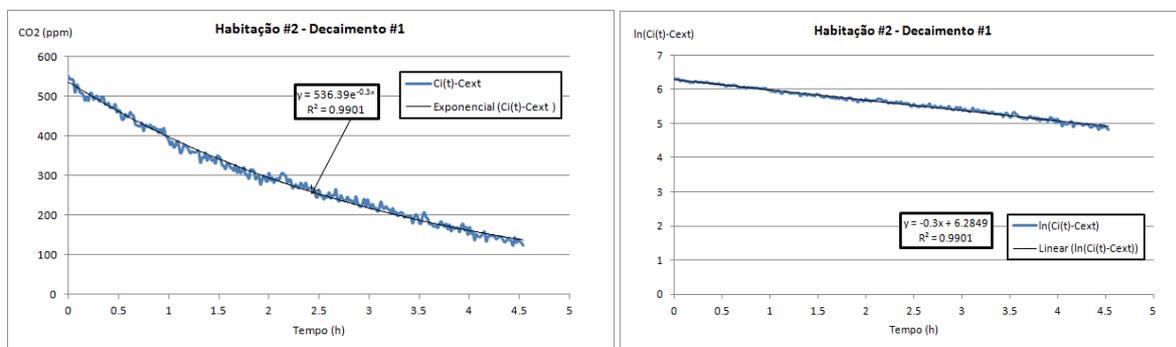


Figura 4 - Justaposição da função exponencial sobre os dados experimentais da evolução temporal do decaimento da concentração de CO₂ com a respectiva regressão linear

2.6 Técnica da emissão constante de CO₂ metabólico

Na técnica da emissão constante o gás traçador é gerado continuamente no espaço unizona resultando na variação da concentração de CO₂ ao longo do tempo. Resolvendo a equação diferencial (2), utilizando o quociente (1) e o princípio estabelecido em (3), teremos:

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{G}{V} - \lambda (C_{i(t)} - C_{ext}) \quad [\text{mg.m}^{-3}.\text{h}^{-1}] \quad (13)$$

A solução da equação diferencial (13), com G, C_{ext} e Q constantes, no intervalo de tempo definido pelo instante inicial t₀ para a concentração inicial C₀ e pelo instante final t para a concentração C_{i(t)}, obtém-se a expressão da variação da concentração do gás:

³⁷ Com esta técnica é possível identificar qualquer alteração dos parâmetros de ventilação visto que é mais fácil identificar a alteração do declive de uma recta do que uma alteração numa função exponencial. A robustez dos resultados é aferida através do maior ou menor valor do coeficiente de regressão linear R (Asadi *et al.*, 2010). Os ajustamentos realizados no Microsoft Excel devolvem, geralmente, o quadrado deste valor.

$$C_i(t) - C_{\text{equi}} = (C_{(0)} - C_{\text{equi}}) \cdot e^{-\lambda(t-t_0)} \quad [-] \quad (14)$$

em que C_{equi} é a concentração de equilíbrio definida em (4).

2.6.1 Tratamento de dados na técnica da emissão constante de CO₂

Para a determinação da taxa de infiltração nesta técnica seleccionam-se os períodos de claro crescimento da concentração de CO₂ ou apenas alguns momentos dessa evolução não se considerando intervalos de tempo em que existem muitas perturbações e não há registo das razões que as expliquem (Barankova *et al.*, 2004; Bekö *et al.*, 2010).

A Figura 5 ilustra as perturbações (quebra na continuidade ou mudança de direcção) que podem ocorrer na evolução temporal das concentrações, como quando se abre uma janela ou quando um, ou mais, ocupantes deixa o espaço unizona. Estes momentos são retirados da análise seleccionando-se apenas os períodos anterior e posterior à perturbação. Também são retirados os períodos cuja diferença da concentração entre o momento inicial e final corresponde sensivelmente à incerteza do sensor. Assim, se se verificam perturbações perto do momento da concentração de equilíbrio, ou imediatamente antes de um decaimento, não será possível determinar a taxa de infiltração no período posterior aos das perturbações (Figura 6).

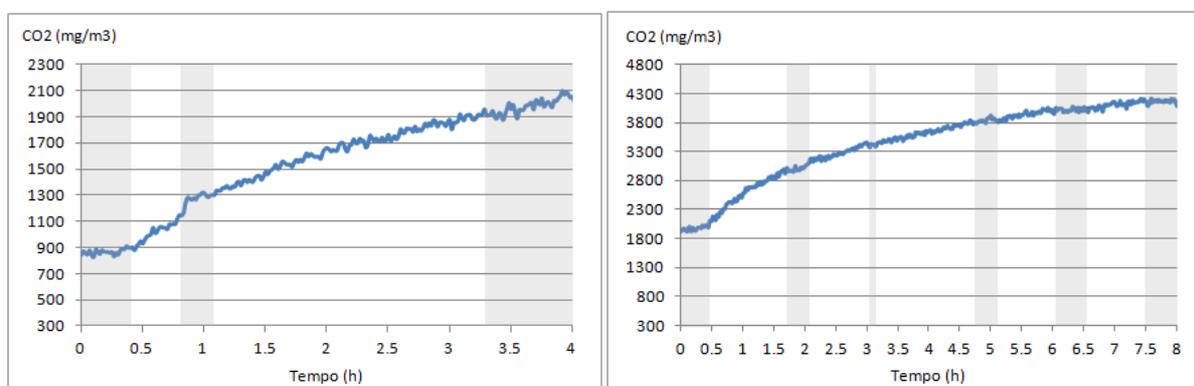


Figura 5 – Fases estacionárias e perturbações na evolução crescente das concentrações em duas das habitações estudadas (habitação #10 à esquerda e habitação #14 à direita)

Posteriormente procede-se à justaposição da curva de uma função exponencial, ajustada aos dados experimentais pelo método dos mínimos quadrados. Para tal desenvolve-se uma folha de cálculo no Microsoft Excel[®] onde se estima o valor da concentração em cada momento:

$$C_i = C_{i-1} + \Delta C_i \quad [-] \quad (14)$$

em que: i) C_{i-1} é o valor da concentração estimada no momento imediatamente anterior; ii) ΔC_i é a variação da concentração (constante) entre os dois momentos, calculada pela aproximação à equação (13) através da regra trapezoidal (Gameiro da Silva, 2009):

$$\Delta C_i = \left(\frac{G}{V} + \lambda C_{\text{ext}} - \lambda C_{i(t)} \right) \Delta t \text{ [mg.m}^{-3}.\text{h}^{-1}] \quad (15)$$

Utilizando a função “Solucionador” do Microsoft Excel[®], com V , C_{ext} e Δt ³⁸ constantes, determinam-se os valores de C_0 ou C_{ini} da curva de ajustamento, G e λ , para o melhor ajuste entre os valores estimados e os dados observados da série temporal seleccionada. Afere-se depois o valor de G através da actividade metabólica registada e estimada como na Tabela 1, e a correlação do processo de regressão linear entre a série de pontos dos dados experimentais e a série de pontos da curva de ajustamento, através da função do coeficiente de Pearson³⁹ (Figura 6).

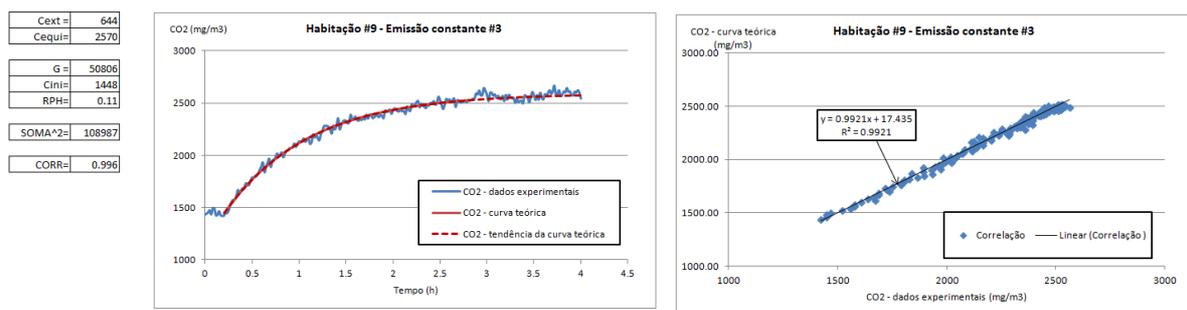


Figura 6 - Determinação da taxa de infiltração de ar pela técnica da emissão constante e correlação do processo de regressão linear dos dados experimentais da evolução de CO₂ com os da função exponencial

2.7 Metodologia e determinação da taxa de renovação do ar regulamentar

Para a determinação das taxas de renovação do ar interior regulamentares seguiu-se a metodologia definida no Decreto-Lei no 80/2006, de 4 de Abril (RCCTE). Este diploma já foi objecto de revisão de modo a transpor para a legislação nacional a EPBD recast, 2010. À excepção, eventual, dos edifícios com sistemas de ventilação mecânica⁴⁰ com recuperador de calor, o RCCTE de 2006 assume que os edifícios possuem características construtivas ou

³⁸ Corresponde à taxa de amostragem configurada para os sensores de CO₂ utilizados (um minuto).

³⁹ A função do coeficiente de Pearson é a covariância de x e y , sobre o produto dos desvios padrões de x e y . Neste caso, a relação entre as duas variáveis x e y pode ser assumida linear, do tipo $y = mx + b$ em que idealmente $m=1$ e $b=0$. O sinal do Coeficiente de Pearson (R) indica a direcção, i.e. se a correlação é positiva ou negativa, ou seja, se uma variável aumenta com a outra ou se quando uma aumenta a outra diminui sempre, e o valor, que varia entre -1 e $+1$, indica a força da correlação, sendo que quando R é maior que 0.7 indica uma correlação forte, entre 0.7 e 0.3 a correlação é moderada e quando menor que 0.3 a correlação é fraca.

⁴⁰ Com uma potência repartida inferior a 25kW.

sistemas de ventilação que asseguram uma taxa mínima de renovação do ar interior⁴¹ de $0.6h^{-1}$. Nestes edifícios ou suas fracções autónomas, a taxa regulamentar determina-se, segundo valores tabelados, em função da exposição ao vento do edifício e da classe de permeabilidade ao vento das caixilharias dos vãos envidraçados exteriores⁴². Por sua vez, a exposição ao vento é uma função da localização, da classe de rugosidade do solo e da altura média ao solo, ponderada pela área, dos vãos exteriores do edifício.

Na proposta de revisão do RCCTE, que esteve para consulta pública e da qual resultou o documento que se encontra para aprovação ministerial, a taxa de renovação do ar interior regulamentar será o valor do projecto de ventilação segundo as NP 1037-1 ou NP 1037-2, para edifícios ventilados naturalmente ou mecanicamente de modo centralizado, respectivamente. Nos edifícios não abrangidos pela conformidade com estas normas, será o valor segundo o método previsto na EN 15242, consideradas algumas adaptações e simplificações, ou o valor constante de um projecto de ventilação aceite pela entidade licenciadora. Prevê-se uma taxa mínima de $0.4h^{-1}$ e uma taxa de referência de $0.6h^{-1}$. Na aplicação da EN 15242, com as respectivas simplificações, nas habitações ventiladas naturalmente considerar-se-á o efeito dos caudais de escoamento através dos vãos exteriores, caixas de estore e grelhas exteriores, e condutas de ventilação natural, por efeito da acção do vento e por efeito da impulsão térmica.

3 RESULTADOS

3.1 Descrição e caracterização da amostra residencial do estudo de campo

Para a campanha de medições foram seleccionadas 20 residências localizadas no Distrito do Porto. A selecção baseou-se na localização (Figura 7), ano de construção, tipologia funcional, e volumes: i) 85% da amostra são apartamentos em edifícios multifamiliares; ii) 15% são habitações unifamiliares, uma das quais é geminada; iii) 75% são habitações com uma cota acima do solo inferior ou igual a 4 pisos típicos (i.e. 3m), 20% inferior a 6 pisos e 5% (habitação #13) superior a 9 pisos, sendo que 50% localizam-se em edifícios com 4 ou menos pisos, 30% com 6 pisos, 10% com 9 pisos e 10% com mais de 9 pisos; iv) as habitações #12 e

⁴¹ Consideram-se apenas os edifícios que cumpram os requisitos da NP 1037-1:2002. Para efeitos regulamentares, os edifícios de habitação que possuem sistemas de ventilação de accionamento manual consideram-se ventilados naturalmente.

⁴² Para a determinação da taxa de renovação do ar interior de habitações com, simultaneamente, vãos com e sem caixas de estore em comunicação com o interior, considera-se a média ponderada pela área para cada grupo de vãos.

13 localizam-se no mesmo edifício; v) todas as habitações são construídas em estrutura resistente de betão armado com sistemas de alvenaria pesada em tijolo furado ou pedra de granito; vi) todas as habitações possuem paredes exteriores de alvenaria dupla, eventualmente com isolamento térmico, ou paredes simples com ETICS, excepto as habitações #2, 5 e 18; vii) os vãos da porta de entrada de todas as moradias e da habitação #14 (apartamento “duplex”) encontram-se expostos ao ambiente exterior; viii) todas as caixilharias não possuem classificação de permeabilidade ao ar; ix) as habitações #4, 7, 8 e 9 possuem uma lareira aberta na sala, das quais as #7 e 8 não possuem “registos”, e as habitações #16, 18 e 19 possuem lareiras com recuperador de calor; x) as habitações #1, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 14 e 20 possuem aparelhos de combustão do tipo A e B a gás natural ou butano no interior das habitações; e nas habitações #3, 17 e 19 são exclusivamente do tipo A; xi) a habitação #14 e as moradias #18, 19 e 20 têm a cozinha e a sala integradas no mesmo espaço; xii) os ocupantes das habitações #6 e 9 fumam no interior; xiii) somente a habitação #15 possui um certificado de desempenho energético e da qualidade do ar interior com a classe energética B; xiv) as habitações #14, 16 e 18 têm patologias interiores por condensação, numa ponte térmica, na casa de banho principal, e na parede exterior junto à lareira, respectivamente; xv) as habitações #6, 10, 14, 16 e 17 possuem sistemas mecânicos centralizados descontínuos de exaustão; xvi) a habitação #19 é ventilada exclusivamente por meios naturais. As tabelas 2 e 3 sintetizam algumas características das habitações da amostra.

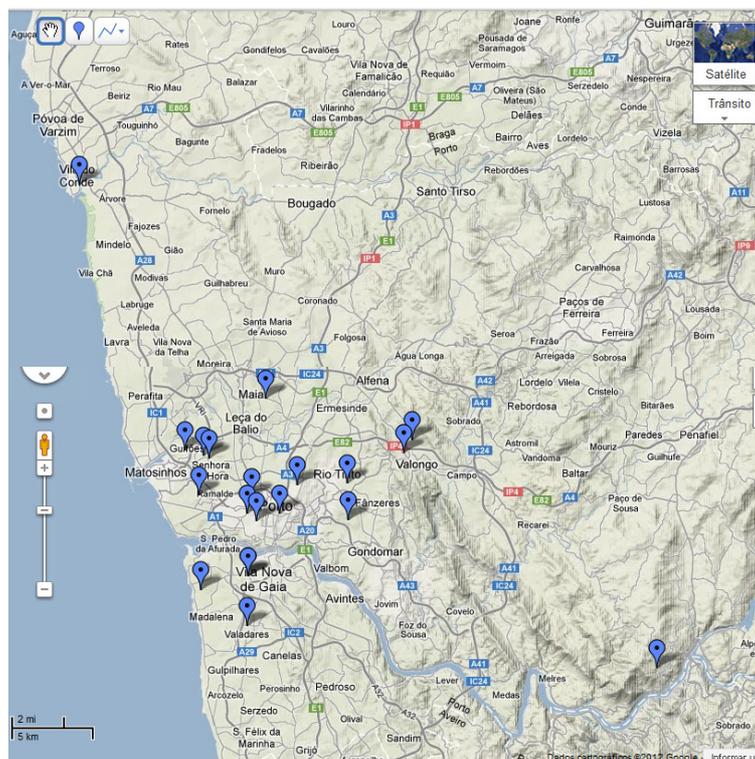


Figura 7 – Localização geográfica das habitações

Tabela 2 - Características gerais das habitações

H	Ano	Local.	Concelho	Tipol.	Ocup. ⁽¹⁾	F.	Orient.Geog. ⁽³⁾	Alt.(m)	Cota(m)	VN	VH
#1	2006	U	Porto	A-T0	2	1	SE	150	153	X ⁽⁵⁾	
#2	1965	U	Porto	A-T1	1	0	SE	100	105	X	
#3	1990	PU	Matosinhos	A-T1	1	2	E/N	90	100	X	
#4	1991	U	Porto	A-T1	1	2	NW/ SE	102	110	X ⁽⁵⁾	
#5	1972	PU	Matosinhos	A-T2	1 ⁽²⁾	2	E/S	93	102	X	
#6	1988	U	Porto	A-T2	2	1	NE	66	67		X ⁽⁶⁾
#7	1996	PU	Matosinhos	A-T2	1 ⁽²⁾	3	NE/SW/NW	55	61	X	
#8	1997	PU	Gondomar	A-T2	2	2	NE/SW	100	107	X ⁽⁵⁾	
#9	1998	PU	Valongo	A-T2	2	2	SE/NW	167	177	X ⁽⁵⁾	
#10	1998	PU	V. N. Gaia	A-T2	3	3	NW/SE/SW	74	81		X ⁽⁵⁾
#11	2003	PU	Gondomar	A-T2	1	3	E/W/N	100	101	X ⁽⁵⁾	
#12	1989	U	V. N. Gaia	A-T3	2	2	E/S	75	88	X	
#13	1989	U	V. N. Gaia	A-T3	3	2	W/S	75	112	X	
#14	2005	U	Porto	A-T3	4	2	NW/SE	99	102 ⁽⁴⁾		X ⁽⁶⁾
#15	2009	PU	Maia	A-T3	2	1	W	75	79	X	
#16	1989	U	Porto	A-T4	2	2	E/W	135	147		X
#17	2008	U	V. do Conde	A-T4	4	3	NE/SW/SE	2	3		X ⁽⁸⁾
#18	1980	PU	Valongo	MG-T3	3 ⁽²⁾	3	E/W/N	158	158	X	
#19	2001	R	Penafiel	MI-T5	2	3	NE/SW/SE	305	308 ⁽⁴⁾	X ⁽⁷⁾	
#20	1999	PU	V. N. Gaia	MI-T4	3	4	NE/SW/NW/SE	25	28 ⁽⁴⁾	X ⁽⁵⁾	

Notas: (1) Número de residentes permanentes durante o período de monitorização; (2) Não inclui ocupantes frequentes: um adulto na H#5, um adulto e uma criança na H#7 e duas crianças na H#18; (3) Observação Google Earth; (4) Altitude média de pavimento da habitação; (5) Possui um esquentador no interior da habitação; (6) Possui um esquentador ventilado no interior; (7) Ventilação exclusiva por meios naturais; (8) Possui uma caldeira estanque para AQS e aquecimento.

Legenda: H= Habitação; Local.= Tipo de localização; Tipol.= Tipologia funcional; Ocup.= Número de ocupantes residentes; F.= Número de fachadas expostas ao ambiente exterior com aberturas de admissão de ar; Orient. Geog.= Orientação Geográfica; Alt.= Altitude de implantação do edifício; Cota= Altitude de pavimento da habitação; VN= Ventilação por meios naturais e sistemas mecânicos locais de operação manual; VH= Ventilação por meios naturais e mecânicos centralizados descontínuos; U= Urbana; PU= Periferia urbana; R= Rural; A= Apartamento em edifício misto ou multifamiliar; MG= Moradia geminada; MI= Moradia isolada.

Tabela 3 - Características construtivas e dimensionais das habitações

H	A (m ²)	V(m ³) ⁽¹⁾	AVE (m ²)	AVI (m ²)	Tipo de Caixilharia	Material
#1	35	81 ⁽²⁾	7.0 ⁽³⁾	0.3	Correr/Oscilante	Alumínio
#2	43	125	0.0	6.0 ⁽³⁾	Correr	Madeira
#3	55	132	4.1 ⁽⁴⁾	2.2	Correr/Oscilante	Alumínio
#4	47	114 ⁽²⁾	4.8 ⁽⁴⁾	0.0	Batente	Alumínio
#5	55	140	8.0 ⁽³⁾	1.5 ⁽³⁾	Correr/Batente	Alumínio
#6	78	201	10.7 ⁽³⁾	0.0	Correr	Alumínio
#7	55	141	14.7 ⁽⁶⁾	0.0	Correr	Alumínio
#8	73	191	8.2 ⁽³⁾	0.0	Correr	Alumínio
#9	91	239	13.3 ⁽⁴⁾	0.0	Correr	Alumínio
#10	87	230 ⁽²⁾	22.8 ⁽⁵⁾	0.0	Correr	Alumínio
#11	63	165	10.7 ⁽³⁾	0.0	Correr/Oscilante	Alumínio
#12	85	234	19.3 ⁽⁴⁾	2.0	Correr/Batente/Fixa	Alumínio
#13	85	234	19.3 ⁽⁴⁾	2.0	Correr/Batente/Fixa	Alumínio
#14	84	202	10.9 ⁽⁷⁾	0.0	Batente/Oscilante	Madeira
#15	98	252	9.7 ⁽⁴⁾	4.7	Correr/Oscilante	Alumínio
#16	114	290	15.2 ⁽³⁾	1.9 ⁽³⁾	Correr	Alumínio
#17	151	378	25.6 ⁽⁵⁾	0.0	Correr	Alumínio
#18	74	191	12.2 ⁽⁴⁾	1.9	Correr/Batente	Alumínio
#19	279	774 ⁽²⁾	24.7 ⁽⁷⁾	0.0	Batente	Alumínio
#20	182	473	27.5 ⁽³⁾	0.0	Correr/Batente	Alumínio

Notas: (1) Volume total da unizona; (2) Possui pés-direitos distintos; (3) Todos os vãos possuem persianas de réguas plásticas com caixa de estore em contacto com o ambiente interior; (4) Somente alguns vãos com persianas com caixa de estore em contacto com o ambiente interior; (5) Vãos exteriores com persianas interiores de réguas plásticas; (6) Vãos exteriores com portadas de réguas de alumínio exteriores; (7) Vãos exteriores com portadas de madeira interiores.

Legenda: H= Habitação; A= Área; V= Volume; AVE= Área de vãos exteriores; AVI= Área de vãos interiores (vãos em contacto com espaços interiores não climatizados).

A campanha de medições realizou-se entre 2 de Junho e 18 de Outubro de 2012. Os sensores foram colocados nos quartos de dormir ou nas salas, de acordo com a disponibilidade dos ocupantes, ou nos espaços onde os ocupantes despendem mais tempo diariamente de modo a permitir a existência de uma concentração média inicial de CO₂ significativa. Os pontos de medição seleccionados encontram-se assinalados em cada habitação nas plantas em Anexo e situam-se, na maioria das situações, a uma distância ao pavimento igual ou superior a 0,8m (sensivelmente o topo de uma mesa) e inferior a 1,2m (aparador ou cómoda) e uma distância a qualquer fonte de produção de CO₂ superior a 1,5m. Como referido na revisão bibliográfica, a selecção dos pontos de medição teve em consideração o afastamento a “pontos mortos”, tais como cantos ou entre peças de mobiliário, bem como o afastamento a zonas de potencial escoamento forte de ar como a proximidade das janelas. A concentração de CO₂ foi continuamente medida e registada durante 3 a 7 dias, obtendo-se um total de 99 períodos válidos para a aplicação da técnica do decaimento da concentração e de 142 para a técnica da emissão constante.

Os residentes da amostra foram instruídos para manter um registo de entradas e saídas de qualquer ocupante, bem como os períodos de abertura de portas ou janelas exteriores e os períodos de funcionamento dos sistemas de exaustão manual ou centralizado nas cozinhas e instalações sanitárias (Quadro 1). Os períodos de funcionamento de qualquer sistema mecânico de ventilação são excluídos da análise. Os ocupantes também são aconselhados a manter todas as janelas fechadas e as portas interiores abertas nas fases de ausência total de ocupantes, bem como por períodos temporais longos aquando da ocupação das habitações e na ausência de ventilação mecânica. Estas são as condições para se verificarem infiltrações por ventilação natural e a boa mistura e distribuição espacial uniforme da concentração de CO₂ interior. O Quadro 1 representa o tipo de registo efectuado em cada habitação.

Quadro 1 - Exemplo do registo efectuado em cada habitação

Registo da ocupação da habitação						
Dia (dd-mm)	Ausência total de ocupantes com todos os vãos exteriores totalmente fechados (hh:mm)		Ocupação (hh:mm /n° pessoas)			Tipo de ocupação dos residentes (*)
	Saída	Entrada	Entrada	Saída	N° pessoas	
(*) Identificar: repouso; trabalho intelectual, visualizar televisão, cozinhar, outros idênticos (trabalho ligeiro a moderado); limpeza da habitação, brincadeiras com crianças, outros idênticos (trabalho moderado a forte).						
Registo da abertura de vãos exteriores						

Dia (dd-mm)	Abertura (hh:mm)	Fecho (hh:mm)
Horário da ventilação mecânica centralizada ou manual		
Começo (hh:mm)		Fim (hh:mm)

3.2 Análise dos resultados das medições efectuadas

As Figuras 8 e 9 apresentam os resultados das taxas obtidas nas diversas habitações, pela técnica do decaimento e pela técnica da emissão, respectivamente. O número de ensaios válidos em cada habitação é variável porque, como o estudo foi realizado no Verão, muitos ocupantes não mantiveram os vãos exteriores fechados, quer na ausência quer na presença de pessoas; ou porque, após o cerramento dos vãos exteriores e a total ausência de pessoas nos espaços em avaliação, o valor da concentrações de CO₂ metabólico era bastante próximo do valor da incerteza de medição do sensor NDIR; ou, ainda, porque nos períodos de tempo com geração de CO₂, a permanência dos ocupantes era de curta duração. Noutras situações, a instabilidade dos parâmetros relevantes (concentração de CO₂ exterior, caudais de infiltração e exfiltração e caudais de geração metabólica) originaram perturbações na evolução das concentrações interiores de CO₂ que inibiram a utilização dos dados monitorizados. Os coeficientes de correlação linear obtidos nos ensaios válidos variam entre 0,77 e 1,0, na técnica do decaimento, e entre 0,7 e 1,0, na técnica da emissão constante.

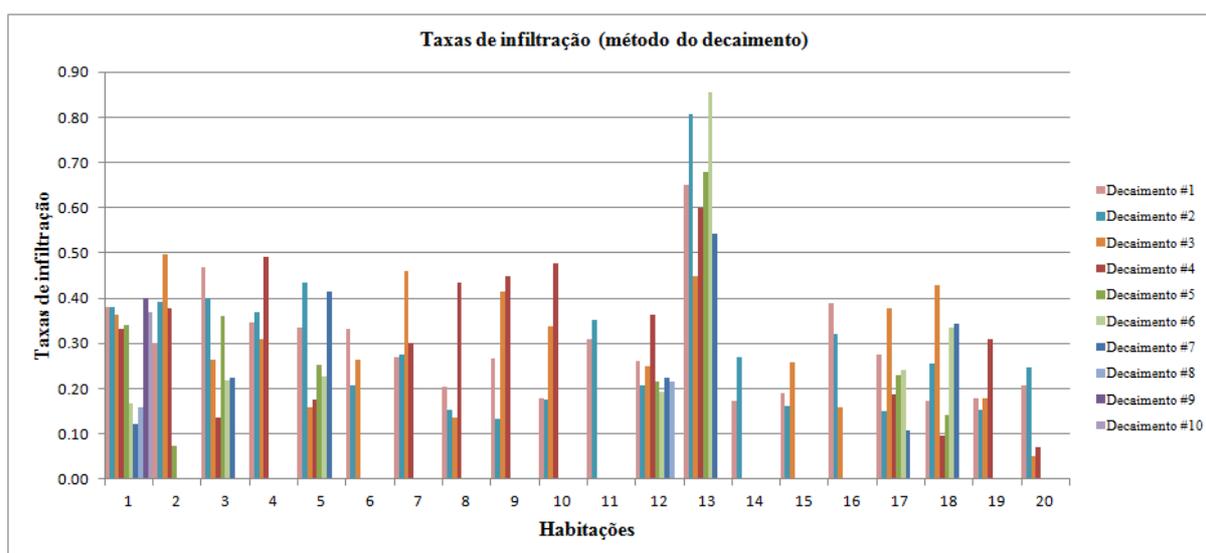


Figura 8 – Taxas de infiltração de ar obtidas pela técnica do decaimento

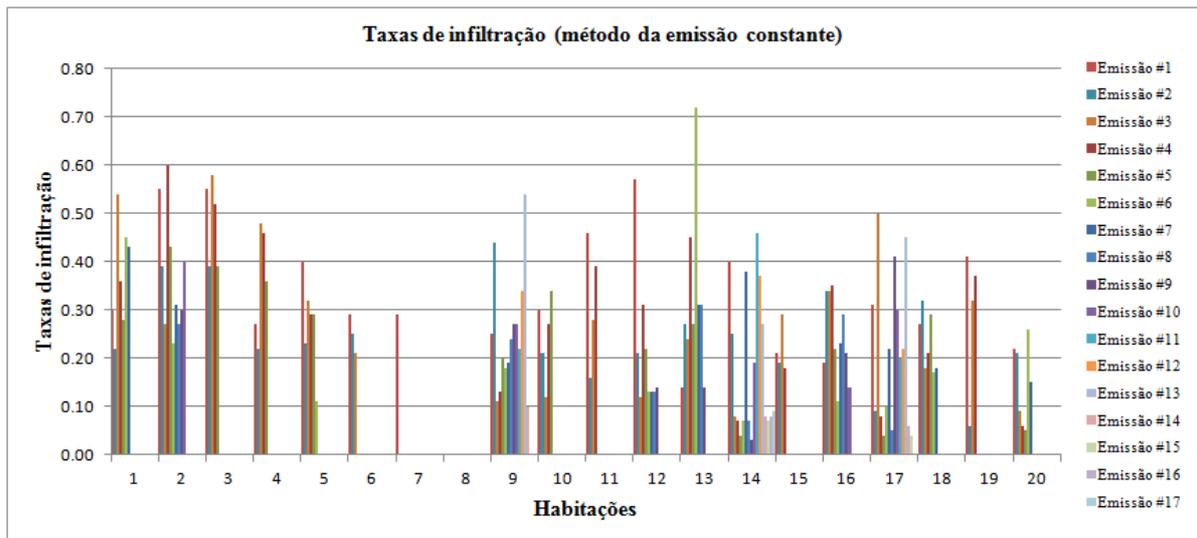


Figura 9 – Taxas de infiltração de ar obtidas pela técnica da emissão constante

O tempo médio dos ensaios foi de $4:05 \pm 1:42$ hh:mm, na técnica do decaimento, e de $0:40 \pm 0:14$ hh:mm, na técnica da emissão constante. Em cada habitação, o tempo médio dos ensaios na técnica do decaimento é superior ao da constante do tempo nominal, excepto nas habitações #4, 14, 17 e 18. No entanto, na técnica da emissão constante, os tempos médios são sempre inferiores à constante do tempo nominal em todas as habitações. Os valores das taxas de infiltração obtidas em cada ensaio, discriminados pela técnica aplicada, e os respectivos coeficientes de correlação linear, dia e horário do momento inicial e final, duração média de tempo e constante do tempo nominal por técnica aplicada, em cada habitação; os valores estimados da concentração de CO_2 exterior; o valor da concentração absoluta de CO_2 no momento final de cada ensaio na técnica de emissão constante; e os caudais mássicos de geração metabólica estimados são apresentados em Anexos. O número total de ocupantes nas habitações da amostra é de 47 pessoas, das quais 40 são adultos (23 mulheres e 17 homens) e 7 crianças. A A_D média, como em (7), para os adultos da amostra é de $1,82 \pm 0,18 \text{m}^2$, que corresponde a uma altura e peso médios de $1,69 \pm 0,08 \text{m}$ e $71 \pm 11,85 \text{kg}$, respectivamente. O caudal mássico médio de geração de CO_2 nos adultos, como em (8), para uma actividade metabólica de referência 1.2met (ocupante acordado, em repouso ou trabalho intelectual ligeiro) é de $37122 \pm 3653 \text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$, e o percentil 50 é de $37293 \text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$.

Pode-se observar nas Figuras 8 e 9 que se verificaram taxas de renovação do ar interior por infiltração muito diversas. Na tabela 4 apresentam-se os valores, mínimos, máximos e médios, das taxas obtidas em cada série de ensaios conforme a técnica aplicada. A Tabela 5 apresenta os valores médios globais obtidos em ambas as técnicas e as taxas estimadas pela actual e

futura metodologia do RCCTE. Excepto na habitação #13, a taxa máxima obtida em todas as restantes habitações é inferior a $0.6h^{-1}$ o que significa um desvio significativo à actual taxa regulamentar mínima, por sua vez raramente aplicável (Figuras 8 e 9 e Tabela 4). Nas restantes habitações a taxa máxima obtida é de $0.6h^{-1}$ na habitação #2 (Figura 9 e Tabela 4).

As taxas médias mais elevadas verificam-se na habitação #13 e as menores na habitação #20. As médias aritméticas e geométricas⁴³ de maior magnitude da taxa de infiltração, discriminadas pela técnica utilizada, são de $0,65\pm 0,14h^{-1}$ e $0,64h^{-1}$ na habitação #13, respectivamente, e as de menor magnitude são de $0,14\pm 0,10h^{-1}$ e $0,12h^{-1}$ na habitação #20, respectivamente, obtidas pela técnica do decaimento em ambas as habitações (Tabela 4). As médias aritméticas globais, máxima e mínima, são de $0,46\pm 0,23h^{-1}$ na habitação #13, e de $0,15\pm 0,08h^{-1}$ na habitação #20, também (Tabela 5). As médias geométricas globais, máxima e mínima, são de $0,4h^{-1}$ e $0,12h^{-1}$, também na habitação #13 e 20, respectivamente (Tabela 5). A taxa mediana global é de $0,26h^{-1}$ - a do 1º quartil é de $0,23h^{-1}$ e a do 3º quartil é de $0,33h^{-1}$ - mas a taxa média aritmética de todas as habitações é de $0,28h^{-1}$ (Anexos). Em todos os ensaios válidos da amostra habitacional (Tabela 4 e Anexos), as taxas obtidas variam entre $0,05h^{-1}$ na habitação #20 e $0,86h^{-1}$ na habitação #13, na técnica do decaimento, e entre $0,03h^{-1}$ na habitação #14 e $0,72h^{-1}$ na habitação #13, na técnica da emissão constante. É também na habitação #13 que se verifica o maior desvio padrão ($0,18h^{-1}$), pela técnica da emissão constante, bem como o maior desvio padrão ($0,23h^{-1}$) das taxas médias aritméticas globais, mas não o maior coeficiente de variação da amostra. Este último verifica-se na habitação #14. O menor desvio padrão ocorre na habitação #6 ($0,04h^{-1}$), pela técnica do decaimento, bem como o menor coeficiente de variação (15%). Em relação aos valores globais, estes ocorrem também na habitação #6 com um desvio padrão de $0,05h^{-1}$ e um coeficiente de variação de 18%.

Tabela 4– Valores das taxas médias obtidas em cada série de ensaios em cada técnica utilizada

H	T	N	Taxa Mínima (h^{-1})	Taxa Máxima (h^{-1})	M. Aritmética (h^{-1})	Desvio P. (h^{-1})	Coefficiente de Variação (%)	M. Geométrica (h^{-1})
#1	D	10	0.12	0.40	0.30	0.11	36	0.28
	E	7	0.22	0.54	0.37	0.11	30	0.35
#2	D	5	0.07	0.50	0.33	0.16	48	0.28
	E	10	0.23	0.60	0.38	0.12	33	0.36
#3	D	7	0.14	0.47	0.29	0.12	40	0.27

⁴³ A média geométrica indica uma tendência central ou um valor típico num conjunto de números utilizando o produto dos valores da série temporal em oposição à soma dos valores utilizada na média aritmética. A média geométrica é definida pela expressão $\prod_{i=1}^n a_i^{1/n}$ em que $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ é o conjunto de valores da série (em http://en.m.wikipedia.org/wiki/Geometric_mean em 10-12-2012). Neste caso indica o valor da taxa de infiltração constante cujo efeito de exposição aos poluentes sobre os ocupantes seria o igual ao do período de tempo da série de ensaios. A média geométrica só difere significativamente da média aritmética se os valores da série temporal apresentarem valores substanciais entre si.

	E	5	0.39	0.58	0.49	0.09	19	0.48
#4	D	4	0.31	0.49	0.38	0.08	21	0.37
	E	5	0.22	0.48	0.36	0.11	31	0.34
#5	D	7	0.16	0.44	0.29	0.11	39	0.27
	E	6	0.11	0.40	0.27	0.10	36	0.25
#6	D	3	0.21	0.33	0.27	0.06	24	0.26
	E	3	0.21	0.29	0.25	0.04	15	0.25
#7	D	4	0.27	0.46	0.33	0.09	28	0.32
	E	1	0.29	0.29	0.29	-	-	0.29
#8	D	4	0.14	0.44	0.23	0.14	60	0.21
	E	0	-	-	-	-	-	-
#9	D	4	0.13	0.45	0.32	0.15	46	0.28
	E	14	0.10	0.54	0.25	0.12	50	0.22
#10	D	4	0.18	0.48	0.29	0.14	49	0.27
	E	5	0.12	0.34	0.25	0.09	36	0.23
#11	D	2	0.31	0.35	0.33	-	-	0.33
	E	4	0.16	0.46	0.32	0.13	41	0.30
#12	D	8	0.19	0.36	0.24	0.05	22	0.24
	E	9	0.12	0.57	0.22	0.14	67	0.19
#13	D	7	0.45	0.86	0.65	0.14	22	0.64
	E	9	0.14	0.72	0.32	0.18	56	0.28
#14	D	2	0.17	0.27	0.22	-	-	0.22
	E	17	0.03	0.46	0.18	0.15	83	0.13
#15	D	3	0.16	0.26	0.20	0.05	24	0.20
	E	4	0.18	0.29	0.22	0.05	23	0.21
#16	D	3	0.16	0.39	0.29	0.11	40	0.27
	E	10	0.11	0.35	0.24	0.08	35	0.23
#17	D	7	0.11	0.38	0.22	0.09	40	0.21
	E	15	0.04	0.50	0.20	0.16	78	0.14
#18	D	7	0.10	0.43	0.25	0.12	48	0.23
	E	7	0.17	0.32	0.23	0.06	27	0.22
#19	D	4	0.15	0.31	0.20	0.07	35	0.20
	E	4	0.06	0.41	0.29	0.16	53	0.24
#20	D	4	0.05	0.25	0.14	0.10	68	0.12
	E	7	0.05	0.26	0.15	0.08	56	0.13

Legenda: H=Habitação; T=Técnica; D= Decaimento; E= Emissão constante; N= Número de ensaios; M= Média; P= Padrão.

Na maioria das habitações, os ensaios pela técnica do decaimento ocorrem durante o dia no período laboral e os pela técnica da emissão constante ocorrem no final do dia e no período de repouso nocturno. A habitação #13 é aquela onde se verificam as maiores diferenças entre a taxa mínima e a máxima ($\Delta 0,72h^{-1}$) e das taxas médias entre o período laboral diurno e o período de repouso nocturno, $0,60h^{-1}$ e $0,28h^{-1}$, respectivamente. Na habitação #14 verifica-se uma tendência semelhante; as taxas médias diurnas ($0,28h^{-1}$) representam o dobro das taxas médias nocturnas ($0,14h^{-1}$).

Tabela 5 – Valores globais das taxas médias medidas e estimação das taxas regulamentares

H	M. Aritmética (h ⁻¹)	Desvio P. (h ⁻¹)	Coefficiente de Variação (%)	M. Geométrica (h ⁻¹)	RCCTE I (h ⁻¹) ⁽¹⁾	RCCTE II (h ⁻¹) ⁽¹⁾	RCCTE II (h ⁻¹) ⁽²⁾
#1	0.33	0.11	33	0.31	1.05	0.46	0.42
#2	0.36	0.13	37	0.33	0.6	0.3	0.27
#3	0.37	0.14	38	0.35	1.09	1.49	1.49
#4	0.37	0.09	25	0.36	0.87	0.53	0.52
#5	0.28	0.10	36	0.26	1.15	1.46	1.45
#6	0.26	0.05	18	0.26	1.00	0.32	0.29

#7	0.32	0.08	25	0.31	1.05	1.25	1.22
#8	0.23	0.14	60	0.21	1.05	0.98	0.96
#9	0.26	0.13	49	0.23	1.02	0.81	0.8
#10	0.27	0.11	41	0.25	0.95	0.61	0.6
#11	0.32	0.10	32	0.31	1.10	0.71	0.69
#12	0.23	0.11	48	0.21	1.15	1.86	1.84
#13	0.46	0.23	51	0.40	1.20	2.65	2.64
#14	0.18	0.14	77	0.13	0.90	0.87	0.85
#15	0.21	0.05	22	0.21	0.95	0.28	0.25
#16	0.25	0.09	35	0.24	1.00	0.93	0.89
#17	0.21	0.14	66	0.16	1.05	1.15	1.14
#18	0.24	0.09	39	0.22	1.04	0.83	0.83
#19	0.25	0.12	49	0.22	0.95	0.72	0.70
#20	0.15	0.08	57	0.12	1.00	1.14	1.14

Notas: (1) Taxa horária de renovação do ar, sob climatização, com uma temperatura interior de referência de 20°C no Inverno; (2) Taxa horária de renovação do ar, sem aquecimento e com isolamento térmico adequado, com uma temperatura interior de 16°C mínimos no Inverno.

Legenda: H=Habitação; M= Média; P= Padrão; RCCTE I= actual RCCTE (D.L. 80/2006 de 4 de Abril); RCCTE II= Projecto de revisão do D.L. 80/2006 de 4 de Abril

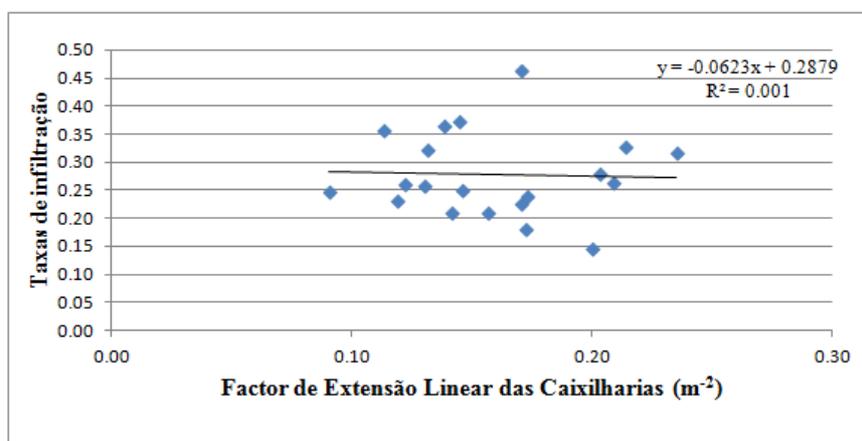


Figura 10 – Relação entre as taxas de infiltração de ar obtidas *in situ* e o Factor de Extensão Linear das Caixilharias

Na Figura 10 representam-se as médias aritméticas das taxas de infiltração obtidas para cada habitação em função do Factor de Extensão Linear das Caixilharias (quociente entre a extensão linear de juntas de caixilharias e o volume do edifício/fracção residencial). Verifica-se a ausência de correlação linear entre ambas as variáveis. As razões para isto poderão ser as seguintes: i) as habitações da amostra não possuem vãos exteriores de grande dimensão, como é tradicional nos países do Sul da Europa para evitar o sobreaquecimento no Verão; ii) todas as habitações possuem dispositivos de protecção aos vãos exteriores que proporcionam uma protecção adicional às infiltrações de ar através destes vãos; iii) apesar de ainda não existir em Portugal uma tradição de ensaio de permeabilidade ao ar das caixilharias, estas têm evoluído

muito em qualidade conceptual, de fabrico e montagem e têm-se tornado progressivamente mais estanques.

3.3 Determinação das taxas regulamentares segundo o RCCTE

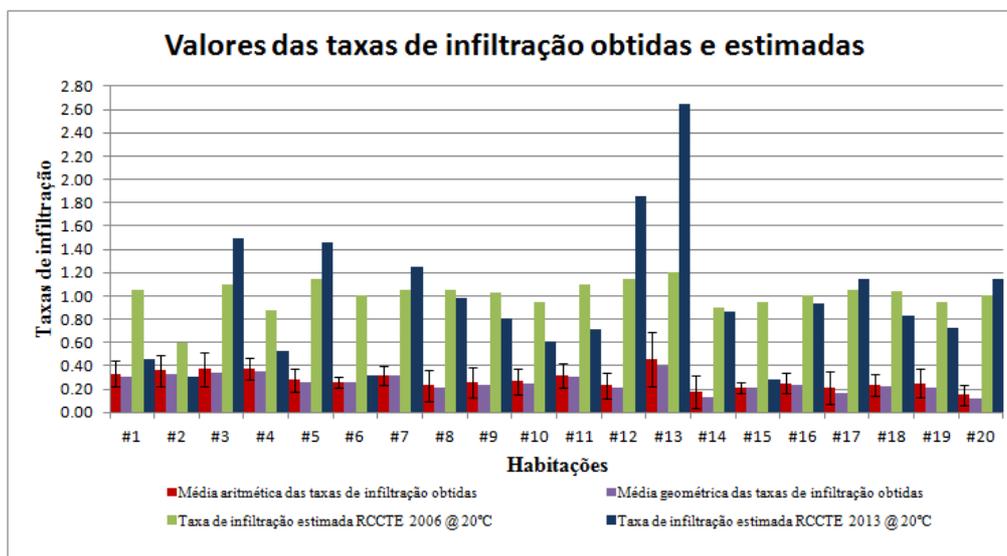


Figura 11 – Taxas médias de infiltração de ar obtidas *in situ* e taxas de infiltração regulamentares estimadas

A Figura 11 apresenta a relação entre as taxas obtidas e as taxas estimadas pelas metodologias do RCCTE. Verifica-se que as taxas estimadas são em geral significativamente superiores às médias das taxas de infiltração obtidas *in situ*. Algumas habitações apresentam, ainda, taxas estimadas pela futura metodologia do RCCTE superiores às estimadas pela actual metodologia. A excepção é a habitação #2 que apresenta uma taxa estimada pela futura metodologia do RCCTE inferior à média das taxas obtidas, bem como à estimada pela actual metodologia. Na Tabela 6 apresentam-se os parâmetros relevantes para a estimação das taxas de infiltração pela metodologia do actual RCCTE (D.L. 80/2006 de 4 de Abril) e as taxas de infiltração por meios naturais em cada habitação. Esta metodologia é baseada em valores tabelados em função da classe de exposição ao ar dos edifícios (Quadro IV.2 do D.L. 80/2006) e da classificação de permeabilidade ao ar das caixilharias dos vãos exteriores (Quadro IV.1 do D.L. 80/2006). A permeabilidade ao vento das caixilharias tem que ser comprovada através de ensaio laboratorial de acordo com a EN 12207, na ausência do qual consideram-se sem qualquer classificação. Todas as caixilharias da amostra não têm classificação de permeabilidade ao ar. As taxas estimadas são reduzidas ou agravadas em $0,05h^{-1}$ e $0,1h^{-1}$ consoante a existência de boa vedação em todo o perímetro das portas de

entrada e, ou, quando o quociente da área de vãos envidraçados sobre a área útil de pavimento da habitação for superior a 15%, respectivamente. Esta taxa será a média ponderada pela área das taxas estimadas para cada conjunto de vãos com as mesmas características. As actuais taxas de infiltração regulamentares por meios naturais podem variar variam entre os $0,6h^{-1}$ e os $1,25h^{-1}$. A rugosidade do terreno é o único parâmetro de avaliação subjectiva que não depende apenas da localização urbana, suburbana ou outra mas, principalmente, da existência de obstáculos naturais ou construídos significativos na envolvente próxima da habitação. Esta avaliação é relevante na habitação #17 que se localiza numa zona urbana mas para a qual se estima uma rugosidade baixa (rugosidade 3). As taxas estimadas variam entre $0,6 h^{-1}$, ou $0,87h^{-1}$, e $1,2h^{-1}$.

Tabela 6 – Estimação das taxas de infiltração regulamentares segundo o RCCTE (D.L. 80/2006 de 4 de Abril)

H	D (km)	R	RT	AVE (m)	CE	V	AR	Ratio (%)	VPE	CP (m ²)	SP (m ²)	λ_w (h ⁻¹)
#1	> 5	A	1	< 10	1	S	N	> 15	S	7.0	0.0	1.05
#2	> 5	A	1	< 10	1	N	N	≤ 15	N	0.0 ⁽¹⁾	0.0 ⁽¹⁾	0.60
#3	< 5	B	2	$[\geq 10; < 18]$	3	N	N	≤ 15	N	3.9	0.2	1.09
#4	> 5	A	1	< 10	1	S	N	≤ 15	S	1.1	3.7	0.87
#5	< 5	B	2	< 10	2	N	N	> 15	N	8.0	0.0	1.15
#6	< 5	B	1	< 10	1	N	N	≤ 15	N	10.7	0.0	1.00
#7	< 5	B	2	< 10	2	N	N	> 15	N	0.0	14.7	1.05
#8	> 5	A	2	< 10	2	S	N	≤ 15	N	8.2	0.0	1.05
#9	> 5	A	2	$[\geq 10; < 18]$	2	S	N	≤ 15	N	9.9	3.4	1.02
#10	< 5	B	1	< 10	1	S	N	> 15	S	0.0	22.8	0.95
#11	> 5	A	2	< 10	2	S	N	> 15	S	10.7	0.0	1.10
#12	< 5	B	2	$[\geq 10; < 18]$	3	N	N	> 15	N	9.4	9.9	1.15
#13	< 5	B	3	> 28	4	N	N	> 15	N	9.4	9.9	1.20
#14	> 5	A	1	< 10	1	S	N	≤ 15	N	0.0	10.9	0.90
#15	> 5	A	1	< 10	1	N	N	≤ 15	S	9.4	0.3	0.95
#16	> 5	A	1	$[\geq 10; < 18]$	1	N	N	≤ 15	N	15.2	0.0	1.00
#17	< 5	B	3	< 10	3	S	N	> 15	S	0.0	25.6	1.05
#18	> 5	A	2	< 10	2	N	N	≤ 15	N	10.4	1.8	1.04
#19	> 5	A	2	< 10	2	N	N	≤ 15	N	0.0	24.7	0.95
#20	< 5	B	2	< 10	2	N	N	≤ 15	S	27.5	0.0	1.00

Notas: (1) Segundo a metodologia do RCCTE apenas se estimam as infiltrações através dos vãos em contacto directo com o ambiente exterior ou em contacto com espaços não climatizados fortemente ventilados. Esta habitação não possui quaisquer vãos exteriores pois a única fachada exposta encontra-se protegida por um espaço fechado não climatizado não fortemente ventilado (marquise).

Legenda: H= Habitação; D= Distância à costa; R= Tipo de região territorial; RT= Rugosidade do terreno; AVE= Altura média dos vãos exteriores; CE= Classe de exposição ao vento; V= Dispositivos de ventilação nas fachadas; AR= Dispositivos de ventilação auto-reguláveis; Ratio= Quociente entre a área de vãos exteriores e a área de pavimento do edifício; VPE= Vedação da porta de entrada; CP= Área de vãos exteriores com caixas de estores; SP= Área de vãos exteriores sem caixas de estores; λ_w = Taxa de infiltração ponderada pela área de vãos exteriores com e sem caixas de estores; S= Sim; N= Não.

Para a habitação #2, que não possui quaisquer vãos em contacto directo com o ambiente exterior, determina-se a taxa mínima regulamentar, e por esta razão é a habitação que apresenta a menor diferença entre a magnitude da taxa medida e a taxa estimada. A taxa máxima estimada é de $1,2h^{-1}$ na habitação #13. A habitação #13 é também aquela onde ocorre a taxa média aritmética mais elevada mas uma taxa estimada $0,74h^{-1}$ superior à taxa média obtida *in situ* (Figura 11). Por outro lado, à excepção desta última, a habitação #4 é onde ocorrem as taxas médias obtidas mais elevadas (média aritmética de $0,37\pm 0,09h^{-1}$ e geométrica de $0,36h^{-1}$) mas é a que possui a menor taxa estimada (Tabela 5 e Figura 11). Salienta-se a proximidade da gama de valores das taxas médias obtidas *in situ* nas habitações #2, 3 e 4 mas que apresentam valores estimados bastante distintos; $0,6h^{-1}$, $1,09h^{-1}$ e $0,87h^{-1}$, respectivamente. Segundo a actual metodologia do RCCTE, a habitação #4 beneficia da sua localização urbana afastada da orla marítima (rugosidade do terreno elevada), da baixa altura média acima do solo, da pequena área dos vãos exteriores e da boa vedação da porta de entrada. Mas em condições reais, a magnitude da taxa de infiltração é mais elevada, provavelmente, devido à existência de grelhas fixas de ventilação no vão exterior da cozinha e por possuir duas fachadas opostas expostas. A primeira é a diferença fundamental entre esta habitação e a habitação #2 e 3. Aliás, o RCCTE não faz qualquer distinção entre as habitações com grelhas exteriores de ventilação não auto-reguláveis e aquelas que não as possuem. A habitação #3 também é penalizada pela sua proximidade à costa marítima num local de baixa rugosidade do terreno. Na habitação #20, onde se verificaram as taxas *in situ* de menor magnitude, estima-se uma das taxas mais elevadas porque é também penalizada pela sua proximidade à costa marítima.

Aliás, à excepção das habitações #13 e 20, ambas localizadas na Região B e com as taxas médias *in situ* de maior e menor magnitude, respectivamente, o intervalo de variação das taxas de infiltração obtidas nas habitações da Região A - [$0,18h^{-1}; 0,37h^{-1}$]- e B - [$0,21h^{-1}; 0,37h^{-1}$] - é semelhante; e verifica-se que várias habitações próximas da linha do mar apresentam taxas de infiltração médias medidas de magnitude inferior às localizadas a maior distância. Isto pode significar que a proximidade à costa marítima poderá não ser um factor de agravamento das infiltrações “naturais”, pois a velocidade do vento que influencia as infiltrações depende da altura acima do solo das habitações e da rugosidade do terreno. À excepção da habitação #20, as taxas obtidas variam entre $0,18$ e $0,37h^{-1}$ nas habitações com vãos exteriores a uma altura média acima do solo inferior a 10m, e dentro deste intervalo de valores, entre $0,23$ e $0,37h^{-1}$, nas habitações com vãos de altura inferior a 18m. Por outro lado,

a habitação #13, localizada a uma altura superior a 28m, muito exposta ao vento, apresenta uma taxa média obtida *in situ* e uma estimada elevada. Nesta amostra não existem habitações com altura acima do solo superior a 18m e inferior a 28m. Assim, a magnitude das taxas de infiltração depende tanto da qualidade de permeabilidade ao ar das soluções construtivas e das condições de utilização das habitações, como da exposição ao vento das habitações e da velocidade do vento no local. Neste contexto, é eventualmente criticável o agravamento da magnitude das taxas estimadas pela proximidade ao mar das habitações, mas defensável a penalização de soluções construtivas que promovam a permeabilidade ao ar da envolvente, tal como a má vedação das portas de entrada ou a implementação de dispositivos de ventilação não reguláveis e de caixilharias de elevada permeabilidade ao ar.

3.4 Determinação das taxas regulamentares segundo a proposta de revisão do RCCTE

Na Tabela 8 e 9 apresentam-se os parâmetros relevantes para a estimação das taxas de renovação do ar interior pela metodologia da proposta de revisão do RCCTE. As taxas estimadas apresentam-se na Tabela 5 e na Figura 11. Trata-se de uma metodologia simplificada baseada na EN 15242, que considera o efeito da permeabilidade ao ar da envolvente (vãos exteriores e caixas de estore) e o efeito dos dispositivos de admissão de ar na envolvente exterior e das condutas de ventilação natural na estimação dos escoamentos, por infiltração e exfiltração, através destes elementos construtivos, resultantes das diferenças de pressão por efeito de impulsão térmica e por acção do vento na envolvente. Também se consideram os caudais escoados pelos sistemas mecânicos ou híbridos de baixa pressão, mas estes não serão aqui considerados para efeitos comparativos com os obtidos. Nesta metodologia, não é considerada a necessidade adicional de ar novo para o funcionamento dos aparelhos de combustão nem o efeito do aumento dos caudais de ventilação pela abertura dos vãos exteriores ou pelos sistemas mecânicos descontínuos não centralizados de funcionamento pontual.

O efeito da acção do vento sobre as superfícies dos edifícios é traduzido pela pressão dinâmica⁴⁴ que pode ser calculada a partir dos valores definidos para os coeficientes de pressão⁴⁵ das várias fachadas (tabelados segundo a EN 15242). Estes últimos são definidos pela classe de protecção ao vento, que é determinada pela relação entre a maior distância dos

⁴⁴ A pressão dinâmica varia com o quadrado da velocidade do vento, e obtém-se pela expressão $P_{\text{dinâmica do vento}} = 0,5\rho v^2$ [Pa].

⁴⁵ O coeficiente de pressão é o parâmetro adimensional que relaciona as pressões nas superfícies exteriores do edifício com a pressão dinâmica induzida pela velocidade do vento, assume-se independente da velocidade do vento incidente mas dependente da direcção do vento sobre as fachadas, da morfologia do próprio edifício, e também das características do terreno e dos obstáculos vizinhos que condicionam a direcção do vento (ASHRAE, 2001; Liddament, 1986).

obstáculos frontais às fachadas expostas do edifício e a respectiva altura, em função da altura do edifício da habitação a estimar. Não se considera, especificamente, a direcção do vento e o seu ângulo de incidência com a superfície da envolvente exterior, apenas se convencionou que, admitindo uma geometria edificada simples, as pressões positivas são geradas na fachada a barlavento, que se subentende ser aquela situada à maior distância a um obstáculo frontal, enquanto na fachada oposta, a sotavento, ou nas laterais, criam-se zonas de depressão ou de pressões negativas. Nas coberturas geram-se sempre pressões negativas com maior atenuação nas coberturas com inclinação superior a 30°. Não é considerado qualquer efeito de recirculação dos fluxos. A velocidade média do vento estima-se para o nível da cobertura do edifício, em função da região territorial, da rugosidade do terreno ao nível da habitação e do gradiente da camada limite atmosférica⁴⁶ do local, com o valor mínimo de 3,6m.s⁻¹. No entanto, durante os períodos de tempo dos ensaios, as velocidades médias corrigidas⁴⁷, ao nível da altura do ponto médio da fachada de cada habitação, obtidas a partir dos dados da estação meteorológica mais próxima⁴⁸, são de 1,2m.s⁻¹, 2,3m.s⁻¹ e 4,6m.s⁻¹, na cidade, na periferia urbana e em zonas sem obstáculos, respectivamente. Se forem discriminadas pela região territorial tomam os valores da seguinte tabela:

Tabela 7 – Velocidades médias do vento corrigidas nos períodos de tempo dos ensaios

	Região A	Região B
Cidade ⁽¹⁾	1.1	1.8
Periferia	2.1	2.5
S/ obstáculos	-	4.6 ⁽²⁾

Notas: (1) A EN 15242 refere que as fórmulas correntes não se devem aplicar a locais muito rugosos, no entanto é de considerar a redução da velocidade do vento em ambientes urbanos pois, eventualmente, para rugosidades elevadas as reduções podem ser, ainda, mais fortes; (2) Corresponde à velocidade média do vento corrigida, durante os ensaios, na habitação #13, cujo ponto médio da fachada tem uma altura de 38,5m acima do solo. A velocidade média do vento na habitação #17 foi inserida na periferia urbana da Região B.

Não foi efectuada qualquer medição da permeabilidade ao ar da envolvente exterior através de ensaio de pressurização, pelo método da porta ventilada, de acordo com a norma EN 13829 (valor n₅₀). Todas as caixas de estore se consideram com uma classe de permeabilidade alta pois nenhuma foi ensaiada de acordo com a EN 1026 ou possui qualquer vedante sob

⁴⁶ Consideram-se, como referência na Região A, os dados de uma estação meteorológica localizada numa zona de rugosidade II (periferia urbana) a uma altura de 10m.

⁴⁷ A correcção da velocidade do vento a partir dos dados de uma estação meteorológica é expressa pela lei de potência $V_{local} = V_{meteo} \left(\frac{\delta_{meteo}}{z_{meteo}} \right)^{\alpha_{meteo}} \left(\frac{z_{edif}}{\delta_{edif}} \right)^{\alpha_{edif}}$ [m.s⁻¹] em que V_{meteo} é a velocidade do vento medida na estação meteorológica (m.s⁻¹), z_{edif} é a cota acima do solo do edifício (m), z_{meteo} é a cota de medição acima do solo na estação meteorológica (m), δ é a altura gradiente da camada limite atmosférica e α é o expoente que caracteriza a rugosidade do solo (ambos tabelados).

⁴⁸ Fonte: IPMA, IP - estação meteorológica localizada a NW da cidade do Porto, a uma altitude de 77m, a 4km da linha de mar numa zona de terreno com poucos obstáculos. Os dados fornecidos, velocidade e direcção do vento, a distribuição probabilística da direcção do vento e a temperatura instantânea do ar, foram obtidos a uma altura acima do solo de 1,5m com uma taxa de amostragem de 10 minutos (em Anexos).

compressão em todo o seu perímetro. As caixas de estore simulam-se considerando uma área igual a 70% das áreas dos respectivos vãos e, para as mesmas condições de pressão, os caudais de infiltração através das de classe de permeabilidade alta são 10 vezes superiores às de baixa permeabilidade. Por outro lado, nesta amostra, os caudais escoados pelas caixas de estore de elevada permeabilidade representam 7% dos caudais escoados pelas caixilharias sem classificação que estas servem. Os caudais escoados através das caixilharias sem classificação representam, para as mesmas condições de diferença de pressão na envolvente, 200%, 370%, 1100% e 3330% dos escoados através das caixilharias de classes 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

A Região Territorial, a rugosidade do terreno, a área dos vãos exteriores⁴⁹ e a existência de dispositivos de ventilação nas fachadas e a área de vãos constam da Tabela 6; a altitude do local e o número de fachadas expostas, da Tabela 2; e o volume das habitações, da Tabela 3. Devido à dificuldade de determinação das áreas de secção de condutas de exaustão das lareiras abertas em edifícios existentes e porque não foi reportado qualquer problema no seu escoamento, estimou-se uma perda de carga baixa nessas condutas. As condutas de ventilação natural com obstruções significativas – filtros em extractores individuais nas cozinhas, eventualmente alguns extractores nas instalações sanitárias, aparelhos de combustão do Tipo B, registos em lareiras abertas ou recuperadores de calor em lareiras – ou os caudais escoados pelos sistemas mecânicos individuais de funcionamento pontual – extractores individuais nas cozinhas e nas instalações sanitárias e aparelhos de combustão do Tipo B ventilados – não são considerados para a estimação da taxa de renovação do ar interior na futura metodologia do RCCTE.

Tabela 8 – Parâmetros para a estimação das taxas de renovação do ar interior segundo a proposta de revisão do RCCTE apresentada para consulta pública

H	ΔT ⁽¹⁾ (°C)	VV (m/s)	ZF	CPV	HE (m)	HF (m)	HOB (m)	DOB ⁽²⁾ (m)	NAT ⁽³⁾	ALT (m)	COB	HIB ⁽⁴⁾
#1	10.2	3.6	B	D	12	6	6	35	S	9	>30°	N
#2	10	3.6	B	D	17	8	6	123	S	12	>30°	N
#3	10	5.2	B	D	25	13	6	108	N	N/A	>30°	N
#4	10	3.6	B	D	17	11	9	50	S	9	10-30°	N
#5	10	5.5	B	D	30	12	6	74	S	21	<10°	N
#6	9.9	3.6	B	P	10	4	12	10	S	9	10- 30°	S
#7	9.9	4.2	B	D	12	9	3	91	S	6	<10°	N
#8	10	3.9	B	D	13	10	6	20	S	6	<10°	N
#9	10.2	3.9	B	D	13	13	6	70	S	3	>30°	N

⁴⁹ Consideram-se, igualmente, os vãos interiores em contacto com espaços não climatizados fortemente ventilados. Nas instalações sanitárias, na ausência de condutas de ventilação natural, mas com vãos em contacto com o exterior, considera-se uma área de abertura igual a 250cm².

#10	9.9	3.6	B	N	16	10	18	66	S	7	<10°	S
#11	10	4.2	B	P	16	4	18	18	S	15	<10°	N
#12	9.9	6.0	M	D	40	16	6	88	S	27	10-30°	N
#13	9.9	8.0	M	D	40	40	18	78	S	3	10-30°	N
#14	10	3.6	B	N	12	6	12	20	S	9	<10°	S
#15	9.9	3.6	B	P	16	7	15	19	S	12	<10°	N
#16	10.1	3.6	B	D	18	15	24	141	S	6	>30°	S
#17	9.7	6.4	B	D	13	4	6	1000	S	14	<10°	S
#18	10.2	3.6	B	D	3	3	3	70	N	N/A	>30°	N
#19	11.7	3.6	B	D	6	6	3	14	N	N/A	>30°	N
#20	9.8	3.6	B	D	6	6	6	26	N	N/A	>30°	N

Notas: (1) Corresponde à diferença máxima das temperaturas do ar interior e exterior que ocorre no Inverno quando se realiza o aquecimento ambiente interior; o efeito convectivo térmico é minorado quando não se efectua qualquer climatização interior; (2) Observação Google Earth; (3) Todos os exaustores de cozinha possuem filtros que anulam o escoamento de ar natural pela respectiva conduta; (4) Estes sistemas não são considerados no futuro regulamento, nem neste estudo para efeitos comparativos.

Legenda: H= Habitação; ΔT = Diferença máxima entre a temperatura do ar interior e a temperatura do ar exterior; VV= Velocidade média do vento no local; ZF= Zona da fachada; CPV= Classe de protecção ao vento; HE= Altura de referência do edifício; HF= Altura de referência da habitação; HOB= Altura do edifício à maior distância em frente das fachadas; DOB= Maior distância aos edifícios em frente das fachadas; NAT= Condutas de ventilação natural, eventualmente com ventiladores que não obturem o escoamento de ar; ALT= Altura das condutas de extracção/exaustão; COB= Ângulo de inclinação da cobertura; HIB= Meios mecânicos descontínuos; B= Zona baixa da fachada; M= Zona média da fachada; D= Desprotegido em relação ao vento; N= Classe de protecção ao vento intermédia ou normal; P= Protegido em relação ao vento; S= Sim; N= Não; N/A= Não aplicável.

Tabela 9 - Parâmetros para a estimação das taxas de renovação do ar interior segundo a proposta de revisão do RCCTE (cont.)

Admissão ar envolvente			Condutas de ventilação natural				Meios mecânicos contínuos	Meios híbridos ⁽⁶⁾	
H	Tipo de abertura	Área (cm ²)	Localização das condutas	ESC	Perda de carga			ESC	CN (m ³ /h)
					Banhos	Lareiras			
#1	R	0 ⁽¹⁾	1 Banho ⁽⁴⁾	EX	A	N/A	N	N/A	0
#2	N/A	0	1 Banho	EX	A	N/A	N	N/A	0
#3	N/A	250 ⁽²⁾	N/A	N/A	N/A	N/A	N	N/A	0
#4	F	25.2	1 Banho ⁽⁵⁾	EX	A	N/A	N	N/A	0
#5	N/A	0	1 Banho	EX	A	N/A	N	N/A	0
#6	N/A	0	2 Banhos	EX	A	N/A	N	EX	90 ⁽⁷⁾
#7	N/A	0	1 Banho/ Lareira aberta	EX	A	B	N	N/A	0
#8	R	0 ⁽¹⁾	2 Banhos/Lareira aberta	EX	A	B	N	N/A	0
#9	R	0 ⁽¹⁾	2 Banhos ⁽⁵⁾	EX	A	N/A	N	N/A	0
#10	F	15	2 Banhos	EX	A	N/A	N	EX	90
#11	F	29	1 Banho	EX/AD	A/A	N/A	N	N/A	0
#12	N/A	0	2 Banhos	EX	A	N/A	N	N/A	0
#13	N/A	0	2 Banhos	EX	A	N/A	N	N/A	0
#14	F	390	2 Banhos	EX	A	N/A	N	EX	90 ⁽⁷⁾
#15	N/A	0	2 Banhos ⁽⁴⁾	EX	A	N/A	N	N/A	0
#16	N/A	0	3 Banhos/ 1 Arrumos/ Cozinha ⁽⁵⁾	EX	A	N/A	N	EX	280
#17	F	26	3 Banhos	EX	A	N/A	N	EX	135
#18	N/A	0 ⁽³⁾	N/A ⁽⁵⁾	N/A	N/A	N/A	N	N/A	0
#19	N/A	1250 ⁽²⁾	N/A ⁽⁵⁾	N/A	N/A	N/A	N	N/A	0
#20	N/A	500 ⁽²⁾	N/A	N/A	N/A	N/A	N	N/A	0

<p>Notas: (1) Vãos exteriores de ventilação com réguas de vidro basculantes que se assumem permanentemente fechados. (2) Os quartos de banho não possuem condutas de exaustão e têm vãos para o exterior pelo que se considera uma abertura fixa até 250cm² de área livre por janela; (3) Possui um vão interior em contacto com um espaço não climatizado não fortemente ventilado (garagem) para ventilação do banho principal; (4) Os extractores de funcionamento pontual (“ventax”) não obturam o escoamento de ar na conduta; (5) Possuem lareiras com recuperador de calor ou lareiras abertas com registo cujas respectivas condutas não são consideradas para efeitos de ventilação natural; (6) Não se consideram os exaustores de cozinhas, “ventax’s”, esquentadores ventilados e outros semelhantes – todas as habitações possuem exaustores de cozinha com filtros, à excepção da habitação #19 (ver nota 4 da Tabela 8); (7) Possuem sistemas de AQS do Tipo B ventilados.</p> <p>Legenda: H= Habitação; ESC= Tipo de escoamento de ar por extracção/exaustão ou admissão/insuflação; CN= Caudal nominal; R= Regulável; F= Fixa; EX= Exaustão/extracção de ar; AD= Admissão de ar; A= Alta; B= Baixa; N/A= Não aplicável.</p>

Verifica-se que as taxas estimadas que mais se aproximam das taxas medidas, com valores inferiores a $0,6h^{-1}$, e que também diminuem significativamente em relação às taxas do actual RCCTE, são as das habitações #1, 2, 4, 6 e 15. À excepção da habitação #4, estas habitações são as que possuem apenas uma única fachada e localizam-se todas em locais de rugosidade elevada e a uma baixa altura acima do solo (rés-do-chão ou 1º andar) o que implicará uma baixa exposição ao vento. As habitações de uma só fachada, sob ventilação natural, serão penalizadas na nova metodologia, em termos de verificação da taxa mínima, por se considerarem inibidas da ventilação transversal, que ocorrerá sempre nas habitações de duas ou mais fachadas expostas e opostas. Nas habitações de duas fachadas considera-se que os elementos permeáveis da envolvente ou os, eventuais, dispositivos de ventilação estão dispostos simetricamente em dois níveis diferentes nas fachadas opostas. Destas, as habitações #2, 6 e 15 não cumprem a taxa mínima regulamentar ($0,4h^{-1}$), sendo que na habitação #2 a taxa estimada ($0,3h^{-1}$) é ligeiramente menor que as taxas médias medidas (aritmética $0,36h^{-1}$ e geométrica $0,33h^{-1}$). No entanto, a habitação #6 possui um sistema de exaustão centralizado descontínuo, aqui não considerado, mas que originaria uma taxa estimada mais elevada e todas estas apresentam uma boa QAI, considerando as concentrações de CO₂ interiores como indicadores de QAI, com concentrações máximas absolutas de CO₂ inferiores a 1500ppm (adiante, Tabela 10 e Figura 12).

As restantes habitações apresentam taxas regulamentares superiores a $0,6h^{-1}$. Destas, nas habitações #3, 5, 7, 12, 13, 17 e 20 os valores das taxas estimadas pela nova metodologia superam os da actual metodologia (na habitação #17 estima-se apenas a taxa de renovação de ar por infiltração natural). Estas últimas localizam-se todas na Região B, na qual a velocidade média do vento é majorada em 10% em relação à Região A, em condições de altura acima do solo e rugosidade do terreno semelhantes. Mantem-se, assim, o agravamento das taxas de infiltração pelo efeito da velocidade média do vento na Região B, excepto para as habitações em locais muito rugosos e, ou, de baixa altura acima do solo. À excepção das habitações #6, 10 e 20, para as quais se assume a velocidade mínima regulamentar, estas são as que se

estimam expostas às maiores velocidades médias do vento, variando entre 4,2 e 8,0m.s⁻¹ (Tabela 8), enquanto as velocidades médias obtidas *in situ* para o mesmo conjunto de habitações variam entre 1,0m.s⁻¹ e 4,6m.s⁻¹.

A diferença entre as velocidades médias do vento estimadas e obtidas é relevante na habitação #12 pelo facto de a velocidade média do vento local ser estimada para o nível da cobertura e assumir-se que a pressão dinâmica no topo do edifício é igual à pressão dinâmica ao nível das padieiras e peitoris das janelas. As habitações #12 e 13 localizam-se no mesmo edifício, em pisos distintos mas partilhando uma fachada; para igual situação de rugosidade, à altura de cada fracção, a velocidade do vento estimada seria igual. Assim, considerando as velocidades médias corrigidas para o ponto médio da fachada da habitação, obtidas a partir dos dados da estação meteorológica, aplicadas às habitações #12 e 13, verifica-se que a pressão dinâmica do vento estimada pela nova metodologia do RCCTE é 2 vezes superior na habitação #12 e 3 vezes superior na habitação #13. Também, para as habitações #1, 2, 4, 6, 10, 14, 15, 16, 18, 19 e 20 estimaram-se valores da velocidade média do vento no local, de acordo com a nova metodologia regulamentar, bastante inferiores a 3,6m.s⁻¹, pois as habitações #1, 2, 4, 6, 10, 14, 16 localizam-se em ambiente urbano denso ou equiparável e as restantes são moradias.

Por outro lado, as simplificações à EN 15242, relativamente à determinação das classes de protecção ao vento e dos respectivos coeficientes de pressão, podem conduzir, consoante a direcção dos ventos dominantes, a uma avaliação enviesada das condições no local. Estão nesta situação as habitações #4, 11, 17, 19 e 20. Para as habitações #4, 19 e 20 estima-se uma classe de protecção ao vento “desprotegida”, mas estas situam-se em locais com edificação ou vegetação envolvente densa, ou em locais de relevo topográfico significativo. A habitação #17 poderia ser considerada como protegida em relação a algumas direcções do vento, pois uma das suas fachadas encontra-se protegida por edifícios vizinhos muito próximos, mas bastante desprotegida em relação às restantes. A habitação #11 poderia ser considerada desprotegida ao vento, mas a construção vizinha mais distante permite estimá-la como intermediamente protegida ao vento. A não consideração dos obstáculos construídos apenas na direcção, ou numa gama de direcções dominantes do vento em cada local, em determinados períodos de tempo relevante (por exemplo, por estação climática regulamentar), poderá conduzir a desvios significativos das reais condições de protecção ao vento das habitações.

O “efeito de chaminé” nas habitações sem climatização no mês mais frio (temperatura mínima do ar de 16°C) tem um impacto diminuto na magnitude das taxas de infiltração estimadas (Tabela 5). A variação das taxas estimadas com uma temperatura de referência do ar interior de 20°C relativamente à situação com uma temperatura de 16°C é menor ou igual a 0,04h⁻¹.

As habitações com vãos de maiores dimensões ou com vãos com caixas de estore de elevada permeabilidade quando sujeitas a uma forte pressão dinâmica do vento apresentam taxas de infiltração elevadas (habitações #5, 12, 13 e 17), pois os caudais escoados através destes elementos são directamente proporcionais às áreas dos vãos e das respectivas caixas de estore, o que pode conduzir a uma taxa de infiltração sobrestimada pois desconhece-se a qualidade de permeabilidade ao ar das caixilharias da amostra.

Também a habitação #3, sujeita a uma relativamente forte pressão dinâmica, com uma altura superior a 10m, é penalizada pela consideração de uma área de admissão de ar de 250cm² devido à ausência da conduta de exaustão na instalação sanitária, face às habitações #18, 19 e 20 que possuem em comum esta característica, mas com áreas de admissão de ar iguais ou superiores. No entanto, as aberturas de admissão de ar, não reguláveis e de pequena dimensão, em habitações de altura até 10m, não têm um grande impacto na magnitude das taxas estimadas face à sua inexistência (habitações #4, 10, 11 e 17). Mas uma maior área livre de admissão de ar para características de exposição ao vento idênticas, ou uma velocidade do vento elevada, já tem um grande impacto nas taxas estimadas, como se verifica nas habitações #14 e 17, respectivamente, face à habitação #4 e às habitações #10 e 11.

Nas habitações #5 e 12, que possuem as condutas de ventilação natural de maior comprimento, verifica-se por simulação, que a magnitude das taxas de infiltração diminuem com o aumento do comprimento da conduta e a distância à cobertura, independentemente das perdas de carga no sistema, o que implica a necessidade de gerir, ou fazer diminuir, as perdas de carga nas condutas verticais de ventilação natural.

3.5 Avaliação da relação entre a QAI e os caudais obtidos ou recomendados

O CO₂ é um bom indicador da QAI em geral mas sobretudo nos edifícios onde os ocupantes são a principal fonte de poluição. Nestes edifícios, a QAI dependerá fundamentalmente do tempo de permanência e do índice de ocupação dos espaços. Outras fontes de produção de CO₂, em espaços residenciais, são o fumo de tabaco, plantas e animais de estimação e aparelhos de queima a gás. A Tabela 10 apresenta: os caudais volúmicos de ar novo por

ocupante obtidos a partir de (1) considerando a média geométrica das taxas obtidas (Tabela 5) e o número máximo de ocupantes permanentes em cada habitação (Tabela 2); as concentrações máximas registadas de CO₂ durante o período de tempo total da monitorização; as concentrações constantes de CO₂ exterior estimadas de acordo com a nota 25; as concentrações de equilíbrio de CO₂ metabólico estimadas obtidas a partir de (4), teoricamente para $t=\infty$, considerando as taxas de geração como em (8) a partir os pesos e alturas obtidos para cada ocupante (Anexos) com uma actividade metabólica de 1,2met; e os rácios de volumetria e área útil por ocupante a partir dos valores constantes da Tabela 3. Apresenta-se também o registo de patologias por condensações superficiais no interior das habitações, observadas *in situ*. Na tabela 11 apresentam-se alguns valores de referência segundo a EN 15251:2007, que diz respeito aos parâmetros de qualidade ambiental interior para a concepção e avaliação do desempenho energético em edifícios abordando as questões de QAI, ambiente térmico, iluminação e acústica. Na Figura 12 apresentam-se, para cada habitação, os caudais de ar novo por ocupante obtidos durante o período de tempo dos ensaios e alguns parâmetros ambientais interiores observados durante o período de monitorização das concentrações do CO₂ interior.

Tabela 10 – Caudais de ar novo e rácios de volumetria e área por ocupante, concentrações absolutas de CO₂ medidas e estimadas, e registo de patologias das habitações analisadas

H	Q (m ³ /h/ocup)	Rácio 1 (m ³ /ocup)	Rácio 2 (m ² /ocup)	CO ₂ máx (ppm)	CO ₂ ext (ppm)	CO ₂ equi. estimado (ppm)	P
#1	13	41	18	1307	350	1762	N
#2	41	125	43	1094	445	1028	N
#3	46	132	55	1010	447	897	N
#4	41	114	47	982	400	869	N
#5	36	140	55	1206	403	972	N
#6	26	100	39	874	340	1064	N
#7	44	141	55	767	403	894	N
#8	20	96	37	684	335	1042	N
#9	28	119	45	1483	358	884	N
#10	19	77	29	1167	328	1328	N
#11	51	165	63	1227	400	871	N
#12	25	117	43	1597	462	1193	N
#13	31	78	28	1272	420	1028	N
#14	7	50	21	2355	370	2347	S
#15	26	126	49	687	330	1123	N
#16	34	145	57	910	358	1013	S
#17	15	95	38	1696	367	1737	N
#18	14	64	25	1230	343	1514	S
#19	85	387	139	2974	436	698	N

#20	19	158	61	1209	411	1532	N
Notas: (1) Inclui ocupantes frequentes: um adulto na habitação #5, um adulto e uma criança na habitação #7 e duas crianças na habitação #18.							
Legenda: Q= Caudal volúmico de ar novo por ocupante; Rácio 1= Volume por ocupante; Rácio 2 = Superfície por ocupante; CO ₂ máx= Concentração máxima absoluta de CO ₂ interior verificada durante o período de monitorização das concentrações; CO _{2 ext} = Concentração máxima de CO ₂ exterior estimada durante o período de monitorização das concentrações; CO _{2 equi.} estimada = Concentração de equilíbrio de CO ₂ metabólico estimada em cada habitação para uma actividade metabólica em cada ocupante de 1,2met; P= Patologias interiores por condensação; S= Sim; N= Não.							

Tabela 11 – Valores de referência segundo a EN 15251:2007 para edifícios novos, remodelados ou existentes

Categoria	Taxa de renovação do ar ⁽¹⁾					Temperatura ar (°C)				HR (%)	CO ₂ ⁽⁴⁾ (ppm)
	Cenário 1		Cenário 2		Não ocupação	Verão		Inverno			
	RPH ⁽²⁾	l/s/m ² ^(a)	l/s/ocup ^(b)	l/s/m ² ⁽³⁾		l/s/m ²	Mín	Máx	Mín		
II	0.6	0.42	7	1	0.05-0,1	23	26	20	25	[25;60]	500
III	0.5	0.35	4	0.6	0.05-0,1	22	27	18	25	[20;70]	800

Notas: (1) Para estimação da taxa de referência de renovação do ar interior deve-se seleccionar o maior dos valores entre (a) ou (b) - no cenário 1 considera-se a taxa de todos os compartimentos, no cenário 2 considera-se a taxa de admissão de ar nos principais compartimentos com a exaustão contínua durante os períodos de ocupação nos compartimentos “húmidos” (28 e 20l/s nas cozinhas e banhos, respectivamente, nos edifícios de categoria II, e 20 e 15l/s, respectivamente, nos edifícios de categoria III); (2) Corresponde ao critério em (a) quando o pé-direito é igual a 2,5m; (3) Aplica-se quando se desconhece o número de ocupantes; (4) Diz respeito ao acréscimo da concentração de CO₂ relativamente à concentração do CO₂ exterior.

Legenda: II= Edifícios com um nível expectável normal de qualidade do ambiente interior, geralmente edifícios novos ou remodelações; III= Edifícios com um nível expectável moderado de qualidade do ambiente interior, geralmente edifícios existentes; RPH= Renovações horárias do ar interior; Mín= Mínima; Máx= Máxima.

As habitações #1, 6, 8, 9, 10, 12, 14, 15, 17, 18 e 20, mais de metade das habitações da amostra, não cumprem os caudais de ar novo mínimos de referência na regulamentação portuguesa (RSECE) de 30m³/(h.ocupante). A tendência projectual contemporânea no sector residencial nas grandes cidades é a da redução de área útil de pavimento por ocupante e da diminuição dos pés-direitos livres devido a razões economicistas. Esta pode-se vir a tornar um problema para uma boa QAI. As habitações #1 e 14 são aquelas que apresentam os dois menores rácios de volume por ocupante, 41 e 50m³ por ocupante, o que corresponde a uma área útil de 18 e 21m² por ocupante, respectivamente, possuindo ambas pés-direitos regulamentares mínimos (2,4m). Também as habitações #10 e 18 apresentam rácios baixos de área útil e volume por ocupante. Por outro lado, apenas nas habitações #4, 6, 7, 8, 15 e 16 se verificam concentrações absolutas máximas de CO₂ inferiores a 1000ppm (Tabela 10), que é a concentração de referência na regulamentação nacional (RSECE) e, também, o valor de concentração designado por “número de Pettenkofer” utilizado, desde a sua génese, como limite na avaliação da QAI baseada em critérios sensoriais (de Gids e Wouters, 2010). No entanto, é de salientar que na habitação #8, as concentrações verificadas de CO₂ são anormalmente baixas porque, durante o período de ocupação, os vãos exteriores estiveram quase sempre abertos. No actual RSECE este limite é referente a uma concentração absoluta média temporal dos ensaios ou à concentração média diária, considerando a ocupação efectiva

do espaço relativamente ao número máximo de ocupantes. Admite-se a conformidade regulamentar com concentrações médias temporais até 1500ppm em edifícios existentes e 1000ppm em edifícios novos.

As habitações que apresentam concentrações máximas absolutas superiores a 1500ppm são as habitações #14, 17 e 19, mas as habitações #1, 14, 17, 18 e 20 apresentam concentrações de equilíbrio de referência de CO₂ metabólico (1,2met) superiores a esse valor (Tabela 10 e Figura 12). Nas habitações #1, 18 e 20, o valor da concentração máxima registada é inferior ao valor da concentração de equilíbrio estimada devido, provavelmente, à abertura dos vãos exteriores ou a reduzidos períodos de ocupação com os vãos encerrados. Aliás, tipicamente, o tempo necessário para que o acréscimo da concentração interior relativamente à concentração exterior atinja 95% do valor da concentração de equilíbrio é de 2,95 vezes a constante de tempo nominal (ver nota 29), podendo considerar-se aproximadamente o triplo deste último parâmetro para que se atinja a concentração de equilíbrio, considerando que a taxa de geração de CO₂, a concentração de CO₂ exterior e o caudal de ar novo se mantêm constantes e que a concentração inicial de CO₂ corresponda à concentração de CO₂ exterior (Persily, 1997). Deduz-se, assim, que quanto menor a taxa de renovação do ar mais longo será o tempo para que se verifiquem as concentrações estimadas na Tabela 10. Por exemplo, na habitação #13, que apresenta uma taxa de infiltração de maior magnitude ($0,46h^{-1}$, média geométrica), demorar-se-á cerca de 7h:30mm de ocupação permanente, com todos os residentes, para que se atinja o valor da concentração de equilíbrio, e na habitação #20 este tempo excederá as 24h. Nas restantes habitações estes tempos variam entre as 8h:30mm (habitação #4) e as 22h:30mm (habitação #14). No entanto, nas habitações #14 e 17 a concentração máxima registada corresponde sensivelmente ao valor da concentração de equilíbrio estimada. Mas as concentrações médias temporais de qualquer poluente serão sempre inferiores às, eventuais, concentrações de equilíbrio ou máximas verificadas, para os mesmos períodos de tempo. Aliás, nas habitações #17 e 19, os picos de CO₂ devem-se a actividades não regulares (uma festa nocturna com as janelas e persianas fechadas e um tempo extraordinário a cozinhar, respectivamente), mas é na habitação #19 que ocorrem os maiores caudais volúmicos por ocupante da amostra ($85m^3/(h.ocupante)$). Na habitação #17, o pico de concentração de CO₂ pode dever-se a uma actividade metabólica dos ocupantes superior à estimada, pois o tempo necessário para que se atinjam as concentrações de equilíbrio nesta habitação é de cerca de 18h e a concentração verificada ocorre após 5h, ou a uma menor taxa de infiltração durante este período. Verificam-se concentrações superiores a 1500ppm apenas durante cerca de 1h,

após a qual se abrem alguns vãos exteriores. Na habitação #19, as concentrações absolutas de CO₂ superiores a 1500ppm foram excedidas em 10,8h representando 17% do tempo total de registo, sendo que o tempo despendido em actividades não regulares (confeção de alimentos) foi de 8,3h (13% do tempo total) e o restante corresponde ao período de confeção da refeição nocturna num só dia. Nesta habitação, o equipamento de monitorização foi colocado no espaço integrado sala/cozinha, não existe qualquer sistema de ventilação mecânico e utiliza-se o gás butano nos aparelhos de queima.

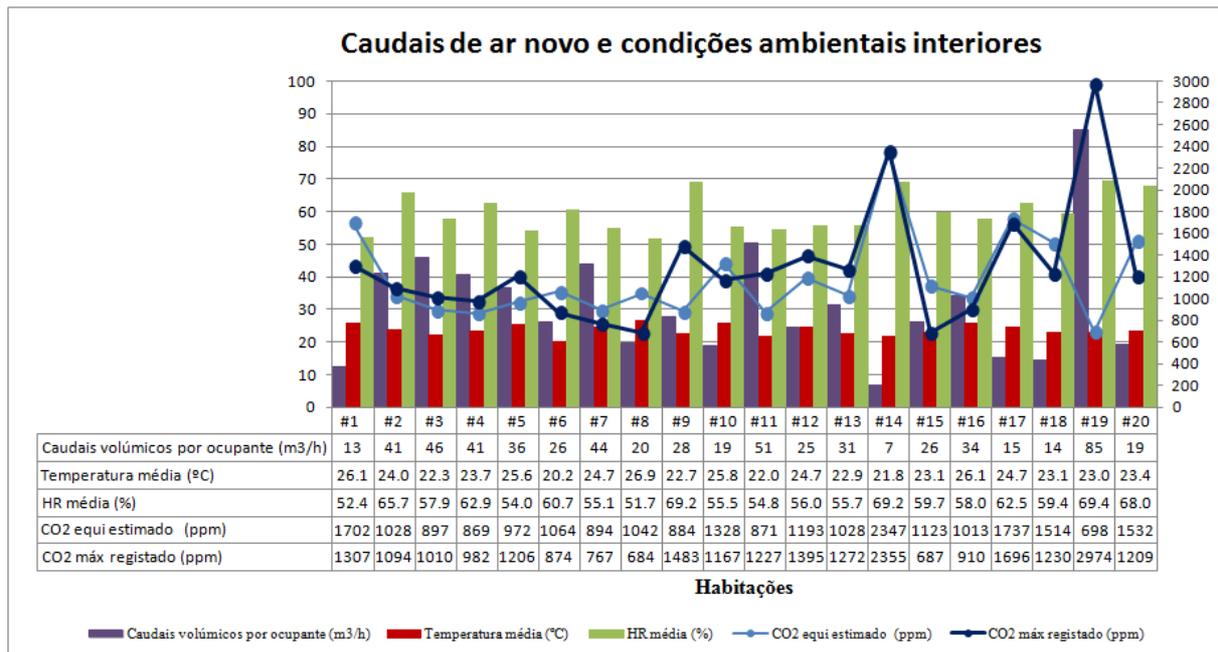


Figura 12 – Caudais de ar novo por ocupante, temperatura do ar e humidade relativa interiores e concentrações de CO₂ máximas registadas e de equilíbrio estimadas

A concentração de referência do CO₂ exterior é de 400ppm. Neste estudo, a média aritmética do CO₂ médio exterior estimado em toda a amostra é de 385±43ppm e em ambiente urbano é de 390±41ppm. A concentração máxima estimada em toda a amostra é de 462ppm. Assim, considerando a concentração recomendada na EN 15251 para os edifícios de Categoria III (800ppm acima da concentração exterior) poder-se-ia considerar admissível uma concentração absoluta de CO₂ interior entre as 1200 e 1300ppm. Mas a EN 15251 não é explícita sobre se este valor se refere a uma concentração máxima, de equilíbrio, ou média temporal. No entanto, as concentrações recomendadas só se devem tomar como máximas para as concentrações de equilíbrio quando os poluentes podem ser perigosos em tempos curtos de exposição, como, por exemplo, com o monóxido de carbono (CO). Neste contexto, assumindo que o CO₂ possa ser um indicador da concentração de outros poluentes, as habitações #1, 10,

14, 17, 18 e 20 apresentam valores de concentrações de equilíbrio superiores a 1300ppm ou acréscimos da concentração de CO₂ acima de CO₂ exterior superiores a 800ppm. As habitações #1, 10, 14 e 18 são as que apresentam as menores áreas face ao número permanente de ocupantes, e todas, à excepção da habitação #18, possuem aparelhos de combustão a gás natural ou butano (Tabela 2). No entanto, nas habitações #1, 10, 18 e 20 as concentrações máximas registadas foram inferiores às concentrações estimadas. Nas habitações #9 e 19, ambas também com aparelhos de combustão a partir de combustíveis fósseis, registaram-se concentrações de CO₂ significativamente superiores às concentrações de equilíbrio estimadas devido a esta fonte de produção de CO₂ (Tabela 2). Nas habitações #14 e 17, as concentrações de equilíbrio estimadas coincidem com as máximas registadas; nestas habitações, os caudais de ar novo por ocupante obtidos são inferiores ou próximos dos 4 l/(s.ocupante) (adiante, Tabela 12) e também possuem aparelhos de combustão a gás natural (Tabela 2). A habitação #14, como se analisará de seguida, também apresenta níveis de HR bastante elevados para a estação de arrefecimento para uma temperatura média relativamente baixa.

Nas habitações #2, 4, 7, 15, 17 e 20 registaram-se valores de temperatura do ar interior, durante todo o período de monitorização, entre os 23°C e os 26°C. Nas restantes habitações variaram entre os 22°C e os 27°C, apenas com ligeiros picos nas habitações #8, 12 e 13 e ligeiras quebras nas habitações #11, 14 e 18 (em Anexo). Na habitação #14 registou-se uma temperatura média de 21,8°C, a mais baixa da amostra durante a estação de arrefecimento. No entanto, nas habitações #1, 5, 8, 10 e 16 registaram-se temperaturas médias do ar superiores a 25°C, a temperatura de referência de Verão no RCCTE. Na habitação #8 registou-se a maior temperatura média, 26,9°C (Figura 12); nesta habitação o regime de abertura dos vãos exteriores é frequente no Verão.

Nenhuma habitação apresenta HR médias superiores a 70% (Figura 12). No entanto, as habitações #4, 9, 14, 18, 19 e 20 necessitam de desumificação segundo a EN 15251 por se verificarem valores de HR máximos superiores a 70% (em Anexo). Mas, nas habitações #18, 19 e 20, os picos de HR verificam-se durante os períodos de confecção de refeições (o equipamento de medição foi colocado na sala/cozinha) e na habitação #4 durante os períodos de higiene pessoal. Apenas as habitações #8, 10 e 11 registaram HR máximas inferiores a 60%.

Na Tabela 12 apresentam-se os valores preconizados na EN 15251 (critérios dos Cenário 1(a) e Cenário 2 (b) da Tabela 11, quer para os edifícios da Categoria II quer para os edifícios da Categoria III), convertidos para uma taxa de renovação horária ou para um caudal de ar novo por ocupante, as taxas estimadas pela futura metodologia do RCCTE e as taxas obtidos *in situ*, e os respectivos caudais de ar novo por ocupante em ambas as situações.

Tabela 12 – Taxas horárias de infiltração e caudais de ar novo por ocupante obtidos *in situ* e estimados pelo futuro RCCTE e pelos critérios da EN 15251

H	<i>In situ</i>		RCCTE 2013		Categoria II - EN 15251			Categoria III - EN 15251			EN 15251
	λ (h ⁻¹) M. Geom.	Q (l/s/p)	λ (h ⁻¹)	Q (l/s/p)	Cenário 1 (a) ⁽¹⁾		Cenário 2 (b) ⁽²⁾	Cenário 1 (a) ⁽¹⁾		Cenário 2 (b) ⁽²⁾	Não ocupação
					λ (h ⁻¹)	Q (l/s/p)	λ (h ⁻¹)	λ (h ⁻¹)	Q (l/s/p)	λ (h ⁻¹)	
#1	0.31	3.5	0.46	5.2	0.65	7.4	0.62	0.54	6.1	0.35	0.08 - 0,16
#2	0.33	11.4	0.30	10.4	0.52	18.0	0.20	0.43	15.0	0.12	0.06 - 0.12
#3	0.35	12.7	1.49	54.8	0.63	23.2	0.19	0.53	19.3	0.11	0.08 - 0.15
#4	0.36	11.3	0.53	16.8	0.62	19.6	0.22	0.51	16.3	0.13	0.07 - 0.15
#5	0.26	10.1	1.46	56.7	0.60	23.2	0.18	0.50	19.3	0.10	0.07 - 0.14
#6	0.26	7.3	0.32	8.9	0.59	16.4	0.25	0.49	13.7	0.14	0.07 - 0.14
#7	0.31	12.2	1.25	48.8	0.59	23.1	0.18	0.49	19.2	0.10	0.07 - 0.14
#8	0.21	5.5	0.98	26.0	0.58	15.3	0.26	0.48	12.8	0.15	0.07 - 0.14
#9	0.23	7.7	0.81	26.8	0.57	19.0	0.21	0.48	15.9	0.12	0.07 - 0.14
#10	0.25	5.2	0.61	13.0	0.57	12.2	0.33	0.48	10.2	0.19	0.07 - 0.14
#11	0.31	14.0	0.71	32.5	0.58	26.6	0.15	0.48	22.2	0.09	0.07 - 0.14
#12	0.21	6.8	1.86	60.5	0.55	17.9	0.22	0.46	14.9	0.12	0.07 - 0.13
#13	0.40	8.7	2.65	57.4	0.55	11.9	0.32	0.46	9.9	0.18	0.07 - 0.13
#14	0.13	1.9	0.87	12.2	0.63	8.8	0.50	0.52	7.3	0.29	0.07 - 0.15
#15	0.21	7.3	0.28	9.8	0.59	20.5	0.20	0.49	17.1	0.11	0.07 - 0.14
#16	0.24	9.5	0.93	37.5	0.59	23.9	0.17	0.49	19.9	0.10	0.07 - 0.14
#17	0.16	4.3	1.15	30.2	0.60	15.9	0.27	0.50	13.2	0.15	0.07 - 0.14
#18	0.22	4.0	0.83	14.7	0.58	10.4	0.39	0.49	8.6	0.23	0.07 - 0.14
#19	0.22	23.6	0.72	77.4	0.54	58.5	0.07	0.45	48.8	0.04	0.06 - 0.13
#20	0.12	5.4	1.14	49.9	0.58	25.5	0.16	0.49	21.2	0.09	0.07 - 0.14

Notas: (1) Critério de estimação das necessidades de ar novo em l/s/m² convertido, em cada caso, para o caudal de ar novo por ocupante e para uma taxa horária de renovação do ar interior – corresponde à especificação da coluna (a) do Cenário 1 da Tabela 11; (2) Critério de estimação das necessidades de ar novo em l/s/ocupante convertido, em cada caso, para uma taxa horária de renovação do ar interior - corresponde à especificação da coluna (b) do Cenário 2 da Tabela 11.

Legenda: RCCTE 2013 = Metodologia da revisão do D.L. 80/2006 de 4 de Abril a uma temperatura interior de 20°C; λ = Taxa horária de renovação do ar interior; Q= Caudal de ar novo por ocupante.

Verifica-se que nas habitações #1, 8, 10, 12, 14, 17, 18 e 20 os caudais obtidos *in situ* são inferiores aos caudais mínimos estabelecidos para os edifícios da Categoria II da EN 15251(7 l/(s.ocupante)). Mas só as habitações #1 e 14 não cumprem, simultaneamente, o estabelecido para a Categoria III (4 l/(s.ocupante)) e apresentam concentrações de equilíbrio estimadas de CO₂ metabólico relativamente elevadas. Por outro lado, segundo a futura

metodologia do RCCTE, todas as habitações, à excepção da habitação #1, cumpririam o critério de caudal de ar novo para os edifícios da Categoria II, mas a habitação #1 cumpriria o critério de ar novo para os edifícios existentes (Categoria III). Inclusivamente nas habitações #2, 6 e 15, onde se verificam taxas estimadas inferiores à taxa mínima regulamentar ($0,4h^{-1}$), estimam-se caudais superiores a $7 \text{ l}/(\text{s.ocupante})$. Aliás, à excepção das habitações #1, 6 e 15, todas as habitações cumpririam o critério de ar novo ($10 \text{ l}/(\text{s.ocupante})$) recomendado para os edifícios ocupados por pessoas com exigências especiais (edifícios da Categoria I). Verifica-se, assim, de acordo com as recomendações da EN 15251, uma elevada sobrestimação dos caudais de ar novo por ocupante por infiltração natural pela futura metodologia do RCCTE, verificando-se o valor máximo de $77,4 \text{ l}/(\text{s.ocupante})$ na habitação #19.

Verifica-se uma maior concordância entre as taxas de infiltração de ar estimadas através da especificação de um caudal de ar novo por ocupante (Cenário 2) e as taxas obtidas *in situ*, do que entre estas últimas e as taxas estimadas através da especificação do caudal por unidade de área (Cenário 1). Verifica-se, também, que as taxas estimadas para esta amostra através das necessidades de ar novo por ocupante (Cenário 2) apresentam valores abaixo de $0,4h^{-1}$, excepto nas habitações #1 e 14 na Categoria II ($0,62h^{-1}$ na habitação #1 e $0,5h^{-1}$ na habitação #14). As necessidades de ar novo especificadas por unidade de área útil são bastante semelhantes entre as diversas habitações, o que implica caudais de ar novo de maior magnitude nas habitações de maior área ou volume. Isto pode traduzir-se numa sobrestimação das necessidades de ar novo e das taxas horárias de renovação do ar nas habitações de maiores dimensões do que noutras de menores dimensões, quando sujeitas às mesmas cargas poluentes. A renovação do ar interior das habitações com taxas de geração de CO_2 idênticas pode fazer-se mais lentamente nas habitações de maiores dimensões, pois os seus ocupantes estarão sujeitos a cargas poluentes elevadas durante períodos de tempo mais curtos, o que conduz a necessidades de ar novo semelhantes, proporcionais aos níveis de ocupação dos espaços. Como os níveis de ocupação nas habitações de maiores dimensões é muito mais variável do que nas mais pequenas, nas primeiras a estimação dos caudais de ar novo especificados por unidade de área ou unidade de volume (como no RCCTE) pode conduzir a desvios significativos relativamente às necessidades de ar novo para a manutenção da uma boa QAI.

As necessidades de ar novo também podem ser calculadas como em (4) quando se desejam manter determinadas concentrações limite, conhecendo as concentrações de CO_2 de geração

metabólica. Para concentrações de CO₂ internas limite entre 500 e 800ppm (900 a 1440mg.m⁻³), com uma taxa de geração de 37000mg.h⁻¹, as necessidades de ar novo podem ser satisfeitas com caudais entre 7 e 11 l/(s.ocupante). Configura-se uma aparente contradição com a magnitude dos caudais recomendados na EN 15251 para as Categorias II e III, com uma sobrestimação destes caudais de ar novo. No sector residencial, a “densidade” de ocupação das habitações e o nível de actividade dos ocupantes é muito variável e não é expectável um nível de actividade metabólica constante equivalente a 1,2met, pois os períodos de tempo sob ocupação compreendem longos períodos de repouso, o que conduziria a menores necessidades de ar novo. No entanto, considera-se que esta razão é insuficiente para explicar as diferenças de magnitude entre os caudais recomendados na Norma e os estimados como em (4).

3.6 Discussão de resultados

No estudo realizado obtiveram-se médias aritméticas das taxas de infiltração entre $0,15 \pm 0,08h^{-1}$ e $0,46 \pm 0,23h^{-1}$ e médias geométricas entre $0,12h^{-1}$ e $0,40h^{-1}$. A magnitude das taxas obtidas *in situ* está em concordância com as taxas de infiltração obtidas noutros estudos internacionais europeus recentes realizados com o CO₂ metabólico como gás traçador. Statova (Barankova) *et al.* (s/data) obtêm uma taxa de infiltração média de $0,45h^{-1}$, em Maio de 2004, num apartamento ventilado naturalmente situado no quarto piso de um edifício multifamiliar em Copenhaga. Em Santamouris *et al.* (2007) medem-se, entre Dezembro de 2003 e Abril de 2004, as concentrações de poluentes e as taxas de infiltração em 50 habitações de baixo rendimento ventiladas naturalmente seleccionadas nas zonas mais pobres da área metropolitana de Atenas. As taxas obtidas variaram entre $0,5h^{-1}$ e $1,5h^{-1}$ e são devidas à qualidade de permeabilidade ao ar da envolvente exterior das habitações. No estudo de Bekö *et al.* (2010) em 500 habitações dinamarquesas, 200 das quais onde habitam crianças asmáticas sintomáticas (caso de estudo) e outras 300 onde habitam crianças assintomáticas (estudo base), obtiveram-se taxas de ventilação médias de $0,62 \pm 0,56h^{-1}$ (média aritmética) e $0,46$ (média geométrica) no caso de estudo e entre $0,62 \pm 0,59h^{-1}$ (média aritmética) e $0,46h^{-1}$ (média geométrica) no estudo base. As taxas de ventilação medianas foram de $0,44h^{-1}$ no caso de estudo e $0,42h^{-1}$ no estudo base. No entanto as taxas médias de infiltração, obtidas em 80% das habitações, foram de $0,52h^{-1}$ (média aritmética) e $0,41h^{-1}$ (média geométrica). Em Montoya *et al.* (2011), em 16 habitações da Catalunha monitorizadas entre Julho e Setembro de 2009 e entre Janeiro e Abril de 2010, obtiveram-se taxas de infiltração entre $0,07h^{-1}$ e

0,54h⁻¹ e uma taxa média geométrica de 0,23h⁻¹, sendo que as taxas de infiltração obtidas durante o Verão foram de maior amplitude do que as obtidas no Inverno. Em Portugal, Santos (2008) obtém entre Fevereiro e Março de 2008, nos quartos das duas habitações estudadas, taxas de renovação horária pela técnica do decaimento entre 0,2h⁻¹ e 0,3h⁻¹ (média de 0,3h⁻¹) na primeira habitação e entre 0,4h⁻¹ e 0,8h⁻¹ (média de 0,6h⁻¹) na segunda habitação. Pela técnica da emissão constante obtém taxas entre 0,3h⁻¹ e 0,6h⁻¹ (média de 0,4h⁻¹) na primeira habitação. No entanto, as taxas de ventilação obtidas nos quartos com as portas interiores fechadas não podem ser representativas das taxas das habitações. Na interpretação da ASTM E741 por Persily (1997), relativamente aos procedimentos a verificar na aplicação do método dos gases traçadores, adaptado à utilização do CO₂ metabólico como gás traçador em espaços unizona, só é admissível considerar as taxas de um compartimento como representativas de toda a unizona quando as concentrações de CO₂ nos restantes espaços da habitação não são inferiores a 10% da concentração média na zona avaliada. Nos espaços em que este requisito não se verifica é preciso garantir que não existem caudais significativos entre esses compartimentos e a zona testada, tal como em Asadi *et al.* (2011).

Noutros estudos referidos na revisão bibliográfica, tal como em Sfakianaki *et al.* (2008), utilizando o N₂O (óxido nitroso) injectado, em 20 habitações da Ática, na Grécia, obtêm-se taxas de infiltração entre 0,31 e 1,56h⁻¹ e uma média aritmética de 0,6h⁻¹. Numa habitação em Matosinhos situada no terceiro piso de um edifício multifamiliar construído em 2000, que possui dispositivos auto-reguláveis nos principais compartimentos e na lavandaria e ventilação mecânica descontínua na cozinha, Pinto *et al.* (2003) obtém, pela técnica da emissão homogénea utilizando um gás traçador passivo (hidrocarbonetos perfluorados – PFT) durante duas semanas distintas (Maio 2002 e Janeiro 2003), taxas de renovação do ar interior médias que variam entre 0,26h⁻¹ e 0,42h⁻¹ em Janeiro, e entre 0,33h⁻¹ e 0,49h⁻¹ em Maio, à excepção da lavandaria. Nesta última obteve-se uma taxa média de 0,68h⁻¹ e 0,85h⁻¹ no Inverno e na Primavera, respectivamente. Em Tamura e Wilson (1963), utilizando o He (hélio) injectado, as taxas de infiltração variam entre 0,25h⁻¹ e 0,41h⁻¹ numa habitação, e entre 0,37h⁻¹ e 0,63h⁻¹ na segunda habitação. Nesta última, no segundo Inverno de ensaios, as janelas foram calafetadas e as taxas variaram entre 0,33h⁻¹ e 0,57h⁻¹. No Verão, as taxas medidas variaram entre 0,07h⁻¹ e 0,16h⁻¹ na primeira habitação, e entre 0,11h⁻¹ e 0,23h⁻¹ na segunda habitação. Na moradia da Virgínia, perto do aeroporto de Dulles, estudada em Wallace *et al.* (2002), utilizando o SF₆ (hexafluoreto de enxofre) injectado, a taxa média de infiltração obtida foi de 0,44 ± 0,15h⁻¹ e o percentil 50 foi de 0,49 h⁻¹.

As principais suposições do método devem ser validadas para minimizar a incerteza associada e assegurar a confiança nos resultados. Outras incertezas dizem respeito à qualidade de resposta e aos desvios nos procedimentos de operação dos instrumentos de medição; esta informação é geralmente fornecida pelos fabricantes. As principais suposições do método são a mistura homogênea do gás traçador e a uniformidade da distribuição espacial das concentrações, que os caudais de infiltração e exfiltração se mantenham constantes durante os ensaios, e o conhecimento do valor da concentração exterior de CO₂ que também se assume constante. No presente estudo, não se efectuou qualquer teste de homogeneidade e uniformidade da distribuição espacial das concentrações de CO₂, como definido em Persily (1997) e validado em Montoya *et al.* (2011), mas, em cada habitação, os pontos de medição foram seleccionados de acordo com os estudos referidos na revisão bibliográfica, nomeadamente em Barankova *et al.* (2004), Naydenov *et al.* (2007) e Bulinska *et al.* (2010) e os ocupantes foram instruídos para manter as portas interiores abertas de modo a permitir a distribuição uniforme da concentração de CO₂. No entanto, em habitações ventiladas naturalmente, uma via de infiltração de ar pode-se tornar facilmente uma via de exfiltração por variação das diferenças de pressão na fronteira do sistema, o que dificulta a mistura perfeita do CO₂ metabólico no volume total. Assim, é possível que no volume total da zona se constituam por vezes vários volumes com uma mistura perfeita. Também, como a ocupação humana nos espaços residenciais e as taxas de geração metabólica de CO₂ são muito variáveis, as concentrações podem variar mais rapidamente que o tempo necessário para a mistura perfeita; por isso a técnica da emissão constante está sujeita a erros significativos. De modo a minimizar a incerteza associada às taxas de geração metabólica de CO₂, estimaram-se as taxas de geração metabólica para níveis de actividade típicos, a partir da medição dos pesos e alturas de 89% dos ocupantes ou a partir da sua estimacão através de observação visual nos restantes, para a aferição dos cálculos devolvidos pelo Microsoft Excel[®] na técnica da emissão constante, cruzando-os com as actividades mencionadas nas folhas de registo efectuadas. Neste estudo, a taxa de geração média de CO₂ nos adultos para uma actividade metabólica de referência ($37122 \pm 3653 \text{mg.h}^{-1}$) é muito semelhante à taxa de geração de referência para o mesmo nível de actividade (37000mg.h^{-1}). Contudo em Santamouris *et al.* (2008), citando Smith *et al.* (1988) e Penman *et al.* (1982), indica-se uma taxa de geração de CO₂ para os adultos de 45780mg.h^{-1} , e entre 47280 e 59100mg.h^{-1} , respectivamente. Em Santamouris *et al.* (2008), citando Smith *et al.* (1988), refere-se também que o erro das taxas de ventilação é semelhante ao erro das taxas de geração de CO₂ metabólico.

Para que os caudais de infiltração e exfiltração se mantenham constantes é necessário que as forças motrizes (vento e diferença de temperatura entre o interior e o exterior) que afectam os fluxos também permaneçam constantes. Aferiu-se a estabilidade destes caudais através de processos de regressão linear e a precisão dos ensaios através dos respectivos coeficientes de correlação linear. Em cada habitação, assume-se que o valor da concentração exterior de CO₂ é igual ao valor mais baixo observado após um longo período de decaimento das concentrações interiores. No entanto, as concentrações exteriores de CO₂ são bastante influenciadas por diversas fontes de poluição exteriores (tráfego automóvel e vegetação) e pela altura acima do solo das habitações. Na técnica do decaimento, a concentração exterior de CO₂ terá de ser subtraída à concentração absoluta interior, pois assume-se que não existem quaisquer outras fontes de CO₂ no interior desocupado. Nesta técnica não se deve calcular a taxa de infiltração quando a concentração interior é muito baixa. Assim, eliminaram-se todos os períodos de decaimento em que a concentração interior era próxima da incerteza de medição dos sensores (± 40 ppm).

Outra fonte de incerteza diz respeito à taxa de amostragem ou ao tempo total dos ensaios. Para Sherman (1990 e 1998), o enviesamento no cálculo da taxa de renovação é negligenciável se os tempos de medição se limitarem aos da ordem do tempo da própria taxa. Para Liddament (1996), o período de tempo típico do ensaio situa-se entre os quinze e os vinte minutos. Santos (2008), referindo a norma E741 da ASTM, indica que o tempo entre duas medições consecutivas deve ser de dois minutos e o tempo total do ensaio deve ser idêntico ao tempo da constante do tempo nominal. Amaral (2008), citando outras fontes, também indica o tempo máximo de dois minutos para a medição entre dois momentos consecutivos e um tempo global do ensaio idêntico ao da constante do tempo nominal, ou mínimo de uma hora. A norma ISO 12569 (2010) refere que o método do decaimento simples é aquele em que o processo de decaimento compreende a medição em múltiplos momentos, intervalados por alguns minutos até dezenas de minutos. Utilizando um período mais longo os erros da medição podem ser minimizados. No seu anexo relativo à estimação do erro da medição da concentração, apresenta-se a relação entre a taxa de renovação e o tempo de decaimento ideal entre os momentos inicial e final. Este intervalo de tempo é idêntico ao da constante do tempo nominal. A duração média de tempo dos ensaios na técnica do decaimento é próxima da constante do tempo nominal. Assim, na técnica do decaimento a incerteza associada à duração de tempo de cada ensaio é mais reduzida do que na técnica da emissão constante.

A magnitude das taxas obtidas pode indicar, como já referido, uma fraca permeabilidade ao ar dos sistemas de caixilharias convencionais mais recentes, não ensaiadas conforme a EN 12207, significativamente menor da que é assumida pelo actual, e também pelo futuro, RCCTE. As taxas médias de maior magnitude verificam-se na habitação #13 e as menores na habitação #20, o que parece indicar uma maior permeabilidade ao ar da envolvente na habitação #13. No entanto, apesar de ambas se localizarem muito perto da costa marítima e independentemente da permeabilidade das respectivas envolventes, a habitação #13 encontra-se muito exposta aos ventos porque se localiza na periferia urbana no 13º piso de um edifício multifamiliar sem quaisquer obstáculos envolventes ao nível do ponto médio da fachada da habitação, enquanto que a habitação #20 é uma moradia localizada numa zona abrigada por várias moradias envolventes próximas de cércea semelhante e por uma mata de eucaliptos envolvente às fachadas onde se posicionam os vãos de maior dimensão. A habitação #20 também não possui outras condutas de ventilação natural, à excepção de uma única que serve o ventilador de exaustão e o sistema de AQS do tipo B na cozinha, e a porta de entrada está bem vedada em todo o seu perímetro apesar de exposta ao ambiente exterior. Por outro lado, a velocidade média do vento corrigida para as condições de rugosidade do terreno e altura acima do solo da habitação é mais forte para a habitação #13 ($4,6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, Tabela 7) do que para a habitação #20 ($1,3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), o que influenciará significativamente as infiltrações, pois a pressão dinâmica do vento na habitação #13 será mais de 12 vezes maior do que na habitação #20.

Também, na habitação #13 a taxa mínima ($0,14\text{h}^{-1}$) ocorre durante a noite com os estores dos quartos encerrados e uma velocidade do vento baixa ($1,0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) e a máxima ($0,86\text{h}^{-1}$) durante o dia com o vento incidente (NW) na fachada dos quartos com os estores abertos e com uma velocidade do vento mais elevada ($8,6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Na habitação #20, as taxas mínimas obtêm-se, invariavelmente, durante o período nocturno com as persianas totalmente fechadas e uma velocidade média local corrigida ($1,0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) menor que durante o período diurno ($1,8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Algumas taxas de maior magnitude durante o período diurno também são obtidas com as persianas encerradas. Assim, a acção do vento influencia significativamente a variação das taxas obtidas em cada habitação, mas esta variação também poderá explicar-se parcialmente pela alteração das condições de utilização, nomeadamente com a operação dos estores tradicionais de régua de plástico dos vãos exteriores.

A variação das taxas médias obtidas nas habitações em ambiente urbano é menor - [$0,18\text{h}^{-1}$; $0,37\text{h}^{-1}$] – do que a das taxas médias obtidas na periferia urbana ou em ambiente urbano

menos denso - $[0,15h^{-1}; 0,46h^{-1}]$, embora a diferença entre as taxas médias mínimas nas duas categorias seja diminuta. A diferença entre as taxas máximas nas duas categorias é maior do que entre as taxas média mínimas, possivelmente porque, verificando-se uma correlação inexistente entre as taxas obtidas e a extensão linear das juntas das caixilharias, as habitações em ambiente urbano estão menos expostas ao vento e, eventualmente, menos sujeitas a ventos fortes ou muito variáveis. Estes resultados também podem indicar a dificuldade de tipificação da exposição e da velocidade do vento na periferia urbana, pois a densidade do edificado e o tipo de ocupação territorial são extremamente diversas. Por conseguinte, o processo de determinação destes parâmetros na(s) metodologia(s) do RCCTE pode conduzir a desvios significativos nas taxas estimadas. Salienta-se, também, que as variações mais restritas observadas entre as taxas mínimas obtidas em cada técnica utilizada, em cada habitação, em oposição às variações mais amplas entre taxas máximas obtidas, sugerem que a variação nas taxas máximas se deve à variação da acção do vento, enquanto as taxas mínimas são mais características da permeabilidade ao ar das soluções construtivas dos edifícios. Assim, se a magnitude das taxas médias de infiltração depende fundamentalmente das características construtivas e da exposição ao vento das habitações, a sua variabilidade é sobretudo explicável pelo efeito da acção do vento e pelo efeito das diferenças de temperatura entre o interior e o exterior. Em Bekö *et al.* (2010), não se verifica uma influência significativa das diferenças de temperatura entre o interior e o exterior nas taxas de ventilação. Também em Pinto *et al.* (2003) se verifica a ausência do “efeito de chaminé” devido à pequena diferença de temperatura entre o interior e o exterior, usual em Portugal. Mas, em Wallace *et al.* (2002), verifica-se que uma diferença média de temperatura de 10°C produz um aumento de cerca de $0,4h^{-1}$ mas sem a evidência clara de uma dependência linear ou exponencial.

O menor desvio padrão e o menor coeficiente de variação (18%) ocorre na habitação #6 que apresenta também uma taxa média de infiltração igual à mediana da amostra ($0,26h^{-1}$) e uma taxa mínima relativamente elevada ($0,21h^{-1}$) e o maior coeficiente de variação ocorre na habitação #14. Ambas se encontram pouco expostas ao vento, pois localizam-se em ambiente urbano denso e a uma altura média acima do solo baixa. A habitação #14 também possui uma área de abertura livre permanente de admissão de ar (390 cm^2 , sem grelha), significativamente maior que nas demais habitações. Tipicamente, um caminho de infiltração longo e de secção reduzida exhibe um fluxo laminar com uma resistência proporcional à velocidade do vento enquanto as frinchas ou aberturas de maior dimensão apresentam uma resistência ao escoamento proporcional ao quadrado da velocidade do fluxo incidente (ASHRAE Journal,

2001). Assim, as habitações com uma gama de variação das taxas de infiltração bastante restrita ou bastante ampla, ou seja, com coeficientes de variação muito baixos ou altos, podem revelar uma permeabilidade ao ar das caixilharias e restante envolvente relativamente elevada em locais pouco expostos ao vento.

A incerteza na determinação das taxas de infiltração deve-se à influência de vários factores perturbadores, nomeadamente às condições meteorológicas (velocidade e direcção do vento, temperatura exterior). Para a avaliação da influência das condições climáticas exteriores nas taxas de infiltração também são recomendáveis períodos de tempo de monitorização mais prolongados abrangendo uma gama mais ampla de condições como, por exemplo, variações mais amplas da velocidade do vento e um maior número de ensaios em cada habitação. Esta abordagem requer a obtenção de dados meteorológicos representativos através de estações meteorológicas colocadas ao nível da fachada das habitações e de outras vias relevantes de escoamentos de ar, de modo a minimizar a incerteza associada a estes parâmetros (velocidade e direcção do vento, temperatura exterior) a partir dos dados de estações meteorológicas distantes. Neste estudo não foi possível dispor desta informação detalhada para cada edifício, de modo a estudar melhor estas perturbações.

A habitação #14 é a única que regista, sob condições de ocupação e utilização regulares, uma concentração absoluta máxima superior a 1500ppm, sobretudo durante o período de repouso nocturno, e simultaneamente um caudal por ocupante inferior a $30\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, pois nas habitações #17 e 19 as elevadas concentrações verificadas devem-se a actividades extraordinárias ou a actividades pontuais durante um período de tempo de exposição relativamente reduzido. No entanto, como nas habitações #14 e 17 as concentrações máximas registadas coincidem com as concentrações de equilíbrio de referência, poderá ser necessário intensificar os caudais de ar novo face a níveis de ocupação ou actividade metabólica superiores ou para evacuação dos produtos da combustão dos aparelhos de queima existentes. Na habitação #14, apesar da existência de um sistema de exaustão centralizado descontínuo nas instalações sanitárias também se verifica uma elevada HR e patologias por condensação superficial. Na habitação #19, a inexistência de qualquer sistema de ventilação mecânica ou dispositivo de admissão de ar novo implica a abertura dos vãos exteriores para a intensificação da renovação do ar interior, sobretudo para a evacuação dos produtos de combustão. Nalgumas habitações (#1, 8, 10, 18 e 20), as concentrações de CO_2 regulares verificadas dependeram do regime de abertura dos vãos exteriores ou dos níveis e tempos de ocupação, ou seja, para um grau de

ocupação superior com os vãos exteriores encerrados durante longos períodos de tempo não se verificariam, eventualmente, as concentrações obtidas. Nas habitações #1 e 14, o caudal de ar novo é inferior a 4 l/(s.ocupante) e a volumetria ou a área de superfície disponível por ocupante igualmente reduzida, inferior a 50m³, evidenciando a necessidade da estimação dos caudais constantes de ar novo especificados pelos níveis de ocupação dos espaços.

No entanto, Persily (1997) refere que o valor limite para o CO₂, baseado numa exposição diária de 8h diárias e 40 horas semanais, é de 5000ppm e que as concentrações inferiores a 10000ppm são inócuas em seres humanos saudáveis. De Gids e Wouters (2011), referem que as concentrações mais frequentemente utilizadas para a avaliação da QAI percebida variam entre 1000 e 1500ppm mas que Yaglou (1935) conclui que os visitantes (ocupantes não adaptados) avaliam a QAI de um modo mais crítico do que as pessoas que estão no mesmo espaço há algum tempo (ocupantes adaptados). Em Persily (1997), citando vários autores entre os quais Cain *et al.* (1983), refere-se que os ocupantes adaptados percebem uma QAI aceitável com um terço dos caudais de ar novo para o triplo das concentrações de CO₂ relativamente aos ocupantes não adaptados, o que corresponde a cerca de 2,5 l/(s.ocupante) e uma concentração de aproximadamente 2500ppm (com 400ppm de CO₂ exterior). No entanto, as pessoas adaptam-se rapidamente aos bio-efluentes. Neste contexto, apenas os ocupantes da habitação #14 poderiam perceber uma QAI não aceitável. É exigível o estudo mais detalhado, abrangendo um período de tempo mais longo, entre as concentrações de CO₂ e o “padrão” de ocupação e de utilização dos edifícios residenciais, e entre as concentrações de CO₂ e os poluentes perigosos em curtos tempos de exposição (como o CO) nos espaços residenciais.

Nas habitações #1, 8 e 10, a abertura frequente dos vãos exteriores deve-se às elevadas temperaturas interiores, sendo de considerar elevadas as temperaturas máximas interiores de referência na estação de arrefecimento preconizadas na EN 15251, mais elevadas do que na regulamentação térmica nacional. Também nas habitações #4, 14 e 18 se reportou a abertura frequente dos vãos interiores por questões de conforto higrotérmico percebido; efectivamente estas habitações são bastante húmidas na estação de arrefecimento, situação que tende a agravar-se na estação de aquecimento, sendo que a habitação #14 e 18 apresentam patologias por condensação. Em Persily (1997), refere-se ser possível, apesar de pouco demonstrado, que a má QAI percebida esteja relacionada com o desconforto térmico ou com as concentrações de outros poluentes distintos do CO₂.

Em cada habitação verificam-se grandes desvios geralmente por sobrestimação entre os valores das taxas medidas e os valores das taxas estimadas pelas metodologias do RCCTE. As diferenças variam entre $0,24h^{-1}$ e $0,92h^{-1}$ na actual metodologia e entre $-0,06h^{-1}$ e $2,19h^{-1}$ na futura metodologia. Na actual metodologia penalizam-se, essencialmente, as localizações próximas da costa marítima por se considerarem mais expostas à acção do vento a partir de uma altura superior a 10m em locais pouco rugosos, e as soluções construtivas de maior permeabilidade ao ar da envolvente não opaca. No entanto, a gama de valores tabelados das taxas de renovação já com os factores de agravamento é restrita, entre $0,6h^{-1}$ e $1,25h^{-1}$, o que não permite quer valorizar a qualidade de permeabilidade ao ar da envolvente, quer avaliar as habitações com renovação do ar interior insuficiente para assegurar a QAI, pois a prescrição de uma taxa mínima implica que todas as habitações cumpram esse requisito. Ainda, eventualmente, incentivou à introdução de sistemas mecânicos centralizados contínuos por permitirem taxas inferiores às taxas por ventilação natural ou sistemas mecânicos com recuperação de calor por permitirem taxas inferiores à taxa mínima na estação de aquecimento.

Na futura metodologia penalizam-se também as habitações com soluções construtivas de maior permeabilidade, que não satisfazem à taxa de referência ($0,6h^{-1}$) nos edifícios novos, por serem energeticamente não eficientes, nomeadamente as habitações com caixilharias e caixas de estore não ensaiadas ou de baixa classificação de permeabilidade ao ar (Classe 1 e 2). As habitações sem soluções de ventilação natural ou mecânica não permitem o cumprimento do requisito mínimo de ventilação ($0,4h^{-1}$) como, por vezes, as de uma só fachada, por se considerarem inibidas da ventilação transversal (habitações #2, 6 e 15). Nestes casos, a nova metodologia conduz a soluções construtivas de baixa permeabilidade ao ar com soluções de ventilação natural com admissão de ar através de grelhas auto-reguláveis, eventualmente, combinadas com sistemas mecânicos contínuos de exaustão nos compartimentos húmidos. No entanto, a habitação #1, de uma só fachada, cuja taxa estimada é superior à nova taxa mínima regulamentar e inferior à taxa de referência, apresenta um caudal obtido inferior a 4 l/(s.ocupante) , mas as habitações #2, 6 e 15 que não cumprem o requisito mínimo de ventilação apresentam caudais superiores a 7 l/(s.ocupante) . No edifício do estudo de Pinto *et al.* (2003), com duas fachadas opostas com vãos e duas fachadas “cegas”, verifica-se uma fraca ventilação transversal devido à orientação dos ventos dominantes, incidentes sobre uma das fachadas cegas.

Contudo, na maioria das habitações, as taxas estimadas (75%) são superiores a $0,6h^{-1}$ e em 7 habitações as taxas estimadas pela nova metodologia são superiores às do actual RCCTE e significativamente superiores às taxas obtidas. Estas habitações (#3, 5, 7, 12, 13, 17 e 20) localizam-se todas na Região B e, à excepção das habitações #12 e 13, a uma altura inferior a 10m. Na futura metodologia verifica-se uma sobrestimação da velocidade do vento, mais acentuada na Região B. Neste estudo, a velocidade mínima regulamentar revela-se elevada nas localizações urbanas e de periferia urbana segundo os dados obtidos a partir da estação meteorológica mais próxima, corrigidos para a altura da habitação e para as características de rugosidade do local. A estimacão da velocidade do vento no local faz-se para a altura da cobertura dos edifício, mas considera-se a rugosidade do terreno ao nível da habitação para o ajuste do perfil típico da velocidade do vento para cada categoria de rugosidade. Mas a pressão dinâmica do vento ao nível do ponto médio da fachada da habitação é igual à pressão dinâmica no topo do edifício. Wallace *et al.* (2002) referem que, como a velocidade do vento foi medida na cobertura da moradia do estudo e não ao nível dos pisos, não se sabe qual a velocidade do vento que terá influenciado as infiltrações. Nesse estudo, como a estimacão do efeito da acção do vento não pode ser atribuído à rugosidade do terreno não se sabe também qual a direcção do vento que terá influenciado as infiltrações. Na nova metodologia, a estimacão dos coeficientes de pressão também representa um potencial viés das condições reais sobretudo em ambiente urbano (habitação #1, 2, 4 e 17), pois assume-se que a orientacão da fachada mais desprotegida corresponde sensivelmente à direcção do vento local. Embora esta metodologia permita calcular a diferenca de pressão na envolvente e por conseguinte decidir sobre quais os dispositivos auto-reguláveis mais adequadas, por outro lado o enviesamento das condições de fronteira, nomeadamente a velocidade média local do vento estimada e a velocidade mínima regulamentar ($3,6m.s^{-1}$), poderá conduzir a soluções de ventilação inadequadas, como demonstrado pelas diferenças entre as taxas estimadas e as taxas obtidas.

Na futura metodologia, o recurso ao ensaio de pressurizacão pelo método da porta ventiladora pode revelar-se útil no contexto da reabilitacão de edifícios pois permite fazer comparações da permeabilidade ao ar entre habitações, consoante as condições de ensaio, recuperar elementos construtivos existentes *in situ*, e comparar ou avaliar estratégias de reabilitacão. No entanto, a estanquidade ao ar dos edifícios é apenas um dos parâmetros que afecta as taxas de renovação do ar interior (Liddament, 1996). Por outro lado, trata-se de um método bastante intrusivo que exige equipamento de medição dispendioso e complexo. Assim, o método dos gases

traçadores revela-se mais adequado para a quantificação das infiltrações (ou da ventilação) em condições de diferença de pressão entre o interior e o exterior “natural”, durante tempos mais longos, pois permite simultaneamente a ocupação e a utilização regular das habitações, quando se utiliza o CO₂ metabólico como gás traçador.

O objectivo da ventilação é proporcionar uma boa QAI e conforto higrotérmico dos ocupantes dos edifícios (Liddament, 1996). É importante que a ventilação se faça com o mínimo dispêndio de energia, que os sistemas de ventilação tenham um baixo custo inicial e de operação e impliquem uma manutenção reduzida (Jardinier *et al.*, 2008). A ventilação natural, sempre que possível, deve ser preferível a qualquer outro modo de ventilação, pois pode contribuir significativamente para a melhoria do desempenho energético dos edifícios, por consumir menos energia do que a ventilação mecânica (Nicol e Wilson, 2010). A nova metodologia do RCCTE exigirá soluções construtivas de reduzida permeabilidade ao ar da envolvente dos edifícios. Esta exigência conduzirá por defeito, em edifícios com ventilação natural ou com exaustão mecânica contínua, à aplicação de dispositivos auto-reguláveis nas fachadas para a admissão de ar novo. No estudo de Ridley *et al.* (2003), a substituição das janelas das habitações estudadas por outras menos permeáveis ao ar conduziu à redução significativa da magnitude das taxas de infiltração, mas a instalação de dispositivos auto-reguláveis permitiu assegurar a taxa de renovação considerada recomendável ($0,5h^{-1}$) na legislação inglesa para uma boa QAI e para evitar as patologias por condensação superficial. Salienta-se que no futuro RCCTE não serão consideradas as soluções de ventilação híbrida, entendida no sentido da conjugação da ventilação natural com a ventilação mecânica quando a anterior é insuficiente (El Mankibi *et al.*, 2011), visto que os sistemas de ventilação mecânica descontínuos não se inserem no âmbito do regulamento.

A ventilação natural é de difícil concepção e controlo porque está fortemente dependente das condições climáticas exteriores, nomeadamente da acção do vento e das pressões de origem térmica, das características dos vãos exteriores, da forma e volumetria dos edifícios, e do ambiente natural e edificado envolvente. Devido à aleatoriedade dos fenómenos naturais, a abordagem regulamentar da ventilação natural baseada na implementação de grelhas exteriores auto-reguláveis ou baseada nas soluções preconizadas na NP 1037-1, que diz respeito à ventilação e evacuação dos produtos da combustão dos locais com aparelhos a gás em edifícios de habitação com ventilação natural, configura-se limitada apesar de um maior controlo dos caudais de ar novo. Por outro lado, a abertura dos vãos exteriores é uma solução

adaptativa comum aos ocupantes dos espaços residenciais que adequam os caudais de ventilação natural às suas preferências ou exigências de QAI ou de conforto higrotérmico. Este modo de ventilação natural permite adequar os caudais de ar novo, à variabilidade da actividade dos ocupantes, do tempo de permanência e da ocupação dos espaços, ou à variabilidade de outras fontes poluentes, geralmente aumentando-os. Este controlo permite no Verão arrefecer as habitações durante a noite com poupança de energia ou reduzir o desconforto higrotérmico no Inverno.

A tendência da ventilação no futuro considerará os ocupantes, o edifício e o ambiente exterior de forma integrada, considerando as preferências individuais sempre que possível. A ventilação controlada pelas necessidades (DCV, acrónimo da designação inglesa “Demand Controlled Ventilation”) é uma estratégia de controlo de ventilação mecânica, energeticamente eficiente, pois permite fornecer os caudais de ar novo estritamente necessários aos ocupantes dos edifícios. Assim, a DCV aplicada a soluções de ventilação natural baseadas nas exigências dos ocupantes residenciais cumprirá igualmente os objectivos da QAI e conforto higrotérmico optimizados. A variação dos caudais globais quando comparados com o caudal anual permanente preconizado na regulamentação, e a redução dos caudais para uma ventilação mínima durante os períodos de não ocupação das habitações, permite uma elevada poupança de energia sem prejuízo da QAI (Jardinier *et al.*, 2008). Já Roijen *et al.* (2010) identificavam que as grelhas não reguláveis implicavam uma grande probabilidade de desconforto devido às correntes de ar quando os caudais de ar novo aumentam com o aumento das pressões dinâmicas do vento sobre as fachadas, e que a diferença entre os dispositivos auto-reguláveis e os dispositivos semelhantes reguláveis electronicamente estaria no conforto térmico e na poupança energética, com vantagem para os últimos. Nas habitações deste estudo, a taxa de ventilação necessária segundo a EN 15251 nos períodos de ausência de ocupantes varia entre $0,06h^{-1}$ e $0,16h^{-1}$, e é significativamente inferior às taxas médias obtidas em qualquer habitação da amostra.



Figura 13 - Instalação experimental de sensores de CO₂ e humidade para janelas com actuadores motorizados numa sala de aulas da Universidade de Lyon (Fonte: El Mankibi *et al.*, 2011)



Figura 14 - Sensores, controladores e actuadores motorizados comerciais para vãos envidraçados (Fonte: <http://www.airtherm.co.uk/> e <http://www.secontrols.com/window-automation/>)

As soluções de DCV aplicadas à ventilação natural são geralmente constituídas por sensores, controladores e actuadores motorizados colocados em vãos exteriores para a admissão de ar novo (Figura 13 e Figura 14). Estes sistemas podem ser individualizados ou integrantes de sistemas domóticos, eventualmente acessíveis “online” por computador ou outro equipamento portátil semelhante, e incluem modos de operação manual local. No entanto, o controlo automático é um importante auxiliar para as condições de conforto dos ocupantes visto que a sensibilidade aos poluentes pode diminuir com o aumento do tempo de exposição enquanto a adaptação às condições ambientais interiores adversas aumenta. Os sensores mais comuns medem as concentrações de CO₂, a HR e a temperatura do ar. Mas também podem fazer medições directas das condições climatéricas exteriores, de presença, da velocidade do ar interior e de compostos orgânicos voláteis (VOC), entre outros. A utilização de sensores de CO₂ baseia-se no princípio de que as concentrações deste gás são representativas da

quantidade de ocupantes, quando estas correspondem essencialmente aos bio-efluentes humanos. Os sistemas podem ser configurados, como em El Mankibi *et al.* (2011), para uma concentração máxima desejável de CO₂ provocando a abertura gradual das janelas consoante o aumento da concentração ou inversamente (Figura 13). O preço destes sensores tem decrescido exponencialmente desde a década de 90 enquanto o seu desempenho aumentou, e já incluem funções de auto-calibração. O seu preço representa actualmente cerca de 5 a 10% do custo total da instalação de um sistema inovador de ventilação natural (de Gids e Wouters, 2010). Os sensores de HR têm sido amplamente testados e introduzidos em espaços residenciais porque é reconhecido que o excesso de humidade nas habitações pode ter um efeito sobre os elementos construtivos grave e duradouro (condensações superficiais e intersticiais com eventual colonização biológica ou destruição dos elementos) e porque corrigindo-o podem resolver-se outros aspectos da QAI (Jardinier *et al.*, 2008). O estudo de Jardinier *et al.* (2008) demonstra uma clara relação entre o aumento das concentrações de CO₂ com o aumento da humidade relativa em edifícios residenciais. Existem soluções comerciais em que os sensores de HR estão integrados em dispositivos reguláveis de admissão de ar novo, para vãos envidraçados ou de parede, em habitações com ventilação natural ou híbrida (exaustão dos compartimentos húmidos). Outros sensores poderão vir a ser desenvolvidos para dar resposta a outras cargas poluentes ou às cargas poluentes de novos materiais ou materiais reciclados que se tenham introduzido nas edificações.

Nas habitações #2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 13, 15, 16 e 19 obtêm-se caudais de infiltração de ar novo por ocupante superiores a 7 l.s⁻¹. Mas como referido, em todas as habitações, à excepção da habitação #14, seria premente a melhoria da permeabilidade ao ar da envolvente para a redução dos caudais de ar novo por infiltração. As soluções de ventilação a implementar deveriam assegurar uma taxa de renovação mínima adequada, tanto nos períodos de não ocupação – nesta situação os caudais deveriam variar entre 3,5 l.s⁻¹ na habitação #1 e 28 l.s⁻¹ na habitação #19, segundo a EN 15251 - como nos períodos de ocupação, tendo em conta a ocupação efectiva das habitações. Esta abordagem seria relevante nas habitações de menor área e, ou, de maior “densidade” de ocupação, como por exemplo nas habitações #1, 10, 14 e 18. No entanto, na regulamentação nacional, em edifícios ventilados naturalmente, a taxa de renovação do ar baseia-se em escoamentos de ar permanentes, embora se admita a existência de sistemas mecânicos descontínuos, porque omissos na regulamentação. A EN 15251 baseia-se, igualmente, num caudal constante de ventilação natural ou híbrida mas faz a distinção entre os períodos de ocupação e os de ausência de ocupação. Nas habitações # 1, 8, 10, 14, 18

reportou-se a necessidade da intensificação da renovação do ar interior pelo aumento dos caudais de ar novo através da abertura dos vãos exteriores, tanto por questões de QAI como de conforto higrotérmico percebidos. Na habitação #16 seria necessário intensificar a exaustão dos compartimentos húmidos por se verificarem condensações superficiais com colonização biológica nas instalações sanitárias.

A taxa constante de renovação do ar mínima da regulamentação serve sobretudo para o dimensionamento dos sistemas de ventilação pois não existe uma relação evidente entre os caudais naturais muito transientes e os caudais regulamentares. Para não distorcer o balanço energético dos edifícios residenciais, considera-se relevante a transposição para a regulamentação de uma metodologia que considere o padrão de ocupação e de utilização nominal ou a possibilidade da redução da taxa de referência de renovação do ar com a implementação de sistemas de ventilação natural baseado na variação dos caudais de ventilação configurados pelas exigências dos ocupantes. Muitos países estão a desenvolver sistemas de ventilação domésticos inovadores e energeticamente eficientes e a avaliar os sistemas de DCV aplicados à ventilação natural ou híbrida, validando-os nas suas regulamentações nacionais, de modo a estimular a redução do consumo de energia nos edifícios residenciais (Jardinier *et al.*, 2008). A legislação e os regulamentos podem ser ferramentas eficazes na implementação de soluções que promovam a poupança de energia.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1 Conclusões

Este estudo teve como objectivo principal a avaliação das taxas de infiltração natural em edifícios residenciais existentes, sob ocupação e utilização regulares, e a comparação das taxas obtidas com as taxas estimadas pela metodologia da regulamentação nacional aplicável a estes edifícios (RCCTE). Para a obtenção das taxas de infiltração natural utiliza-se o método dos gases traçadores, através das técnicas do decaimento das concentrações e da emissão constante, e o CO₂ metabólico como gás traçador. As séries de taxas discretas obtidas durante curtos períodos de tempo permitem calcular as taxas médias de infiltração em cada habitação para comparação com as taxas estimadas. O método baseia-se no princípio da conservação da massa do gás traçador. Monitorizando a evolução temporal das concentrações do gás traçador, pode-se inferir a taxa de infiltração através do seu balanço mássico durante os períodos de

tempo seleccionados. Assume-se que o CO₂ metabólico gerado se mistura homogeneamente e que se verifica uma distribuição espacial uniforme no espaço unizona (i. e. cada habitação). Nos períodos de decaimento das concentrações ou de emissão constante de CO₂ seleccionados, assume-se que os caudais de infiltração ou exfiltração e o CO₂ exterior se mantêm constantes, enquanto todos os vãos exteriores se mantêm cerrados e os sistemas mecânicos de ventilação desligados.

As taxas médias aritméticas obtidas variaram entre $0,15 \pm 0,08 \text{h}^{-1}$ e $0,46 \pm 0,23 \text{h}^{-1}$ e as taxas médias geométricas variaram entre $0,12 \text{h}^{-1}$ e $0,40 \text{h}^{-1}$. Em todos os ensaios, as taxas obtidas variaram entre $0,03 \text{h}^{-1}$ e $0,86 \text{h}^{-1}$. A taxa mediana global da amostra é de $0,26 \text{h}^{-1}$ mas a média aritmética é de $0,28 \text{h}^{-1}$. As taxas obtidas estão em concordância com as taxas de infiltração obtidas em vários estudos europeus recentes, utilizando o método dos gases traçadores e o CO₂ metabólico como gás traçador, em habitações ventiladas naturalmente: $0,45 \text{h}^{-1}$ num apartamento de Copenhaga; entre $0,5 \text{h}^{-1}$ e $1,5 \text{h}^{-1}$ em 50 habitações de baixo rendimento na zona metropolitana de Atenas; entre $0,07 \text{h}^{-1}$ e $0,54 \text{h}^{-1}$, e uma taxa média geométrica de $0,23 \text{h}^{-1}$, em 16 habitações da Catalunha.

A taxa mínima regulamentar actual é de $0,6 \text{h}^{-1}$. Na futura metodologia prevê-se uma taxa de referência de $0,6 \text{h}^{-1}$ nos edifícios novos ou intervencionados e uma taxa mínima de $0,4 \text{h}^{-1}$ nos edifícios existentes. As taxas regulamentares estimadas pelo actual RCCTE variam entre $0,87 \text{h}^{-1}$ e $1,2 \text{h}^{-1}$. As taxas estimadas pela futura metodologia do RCCTE, baseada na EN 15242 simplificada e adaptada, variam entre $0,3 \text{h}^{-1}$ e $2,65 \text{h}^{-1}$. As habitações que não cumprem o requisito mínimo de ventilação para os edifícios existentes ($0,4 \text{h}^{-1}$) são, eventualmente, as de uma só fachada em locais de fraca exposição ao vento e que não possuem soluções de ventilação que contrariem a ausência de ventilação cruzada. As habitações sem as soluções de ventilação preconizadas e com envolventes de menor qualidade de permeabilidade ao ar não cumprirão a taxa de referência para os edifícios novos.

A imprevisibilidade dos caudais de ventilação ou infiltração naturais pode conduzir à sobrestimação das taxas de ventilação regulamentares, mas as diferenças entre as taxas obtidas e as taxas regulamentares influenciam a classificação do desempenho energético dos edifícios, distorcendo o respectivo balanço energético, e podem conduzir à concepção de soluções de ventilação inadequadas, não geradoras de poupanças energéticas. Em ambas as metodologias regulamentares analisadas são penalizadas as soluções construtivas de elevada permeabilidade ao ar; mas, na metodologia exigencial do futuro RCCTE, o efeito da

velocidade do vento é significativamente relevante. Na amostra do estudo, verifica-se uma sobrestimação da velocidade regulamentar média do vento local quando comparada com a velocidade do vento local corrigida a partir dos dados da estação meteorológica mais próxima. A velocidade do vento mínima regulamentar é de $3,6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ e a regulamentar estimada mais elevada nesta amostra é de $8,0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. As velocidades do vento corrigidas para os mesmos locais, a partir dos dados da estação meteorológica mais próxima, variam entre $0,9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $4,6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. No futuro RCCTE, a velocidade do vento local é estimada para o nível da cobertura dos edifícios considerando a rugosidade do terreno ao nível da fachada da habitação mas desconhece-se a velocidade do vento que influencia as infiltrações ao nível da fachada em cada habitação, pois não se considera a variação da pressão dinâmica com a altura. O efeito do aumento da diferença de temperaturas entre o interior e o exterior é diminuto nas taxas estimadas, inferior a $0,04\text{h}^{-1}$.

As exigências da ventilação devem satisfazer igualmente as exigências da QAI. O RCCTE também considera os aspectos da QAI. Mais de metade das habitações da amostra não cumpre os caudais de ar novo de referência ($30\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$), mas, à excepção de três habitações, as concentrações máximas absolutas de CO_2 são inferiores a 1500ppmv . Os picos de CO_2 em duas destas habitações devem-se a actividades não regulares durante períodos de tempo reduzidos em relação ao tempo total de monitorização das concentrações de CO_2 . Em algumas habitações, as baixas concentrações de CO_2 observadas devem-se possivelmente à abertura frequente dos vãos exteriores. Não foi possível estimar detalhadamente as concentrações médias temporais durante os períodos de ocupação, consoante a ocupação efectiva das habitações.

4.2 Futuros desenvolvimentos

Como trabalhos futuros, é importante estudar a relação entre o efeito da direcção e da velocidade do vento e das diferenças de temperatura entre o interior e o exterior e as taxas obtidas e investigar outras fontes de incerteza referidas. Deve-se considerar igualmente a estação de aquecimento. Outra abordagem relevante é a avaliação da QAI por métodos directos, através da medição das concentrações de CO_2 e, ou, de outros poluentes, e da QAI percebida por métodos indirectos, tais como questionários. A mesma metodologia também poderá ser aplicável aos parâmetros físicos do conforto higrotérmico percebido, considerando igualmente as acções adaptativas dos ocupantes. Outro trabalho relevante seria a caracterização de amostras representativas do parque habitacional através do valor n_{50} , para

comparação com os valores das taxas obtidas pelo método dos gases traçadores ou com as novas taxas regulamentares estimadas por defeito. Estes estudos podem ser úteis para a melhoria das metodologias de estimação regulamentares e para a implementação regulamentar de soluções de ventilação inovadoras que tenham impacto significativo na melhoria do desempenho energético dos edifícios residenciais ao nível da poupança de energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amaral, M. (2008), “Sistemas de Ventilação Natural e Mistos em Edifícios de Habitação”. *Tese de Doutoramento*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto (Portugal).
- Asadi, E., Costa, J. J., Gameiro da Silva, M. (2011), “Indoor air quality audit implementation in a hotel building in Portugal”. *Building and Environment*, 46 (2011), 1617-1623.
- ASHRAE (2001), “ASHRAE Handbook - Fundamentals”. Chapter 26, Atlanta, 2001.
- ASTM (2006), E741-00 – “Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution”.
- Awbi, H., (1998), “Chapter 7 – Ventilation”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2 (1998), 157-188.
- Barankova P., Naydenov K. G., Melikov A. K., Sundell J. (2004), “Distribution of carbon dioxide produced by people in a room: part 1 - laboratory study”. Proceedings of the “*Roomvent 2004, 9th International Conference on Air Distribution in Rooms*”, Coimbra (Portugal), 5-8 Setembro de 2004.
- Bekö, G., Lund, T., Nors, F., Toftum, J., Clausen, G.(2010), “Ventilation rates in the bedrooms of 500 Danish children”. *Building and Environment*, 45 (2010), 2289-2295.
- Blomsterberg, A., Carlsson, T., Kronvall, J. (1995), “Short Term and Long Term Measurements of Ventilation in Dwellings”. “*16th AIVC Conference on Implementing the Results of Ventilation Research*”, Palm Springs (E.U.A.), 19-22 de Setembro de 1995.
- Bulinska, A. (2007), “Determination of airflow pattern in a residential building using metabolic carbon dioxide concentration measurements”. Book of Abstracts of the “*Roomvent 2007, 10th International Conference on Air Distribution in Rooms*”, Helsínquia (Finlândia), 13-15 de Junho de 2007.
- Bulinska, A. (2010), “Computacional and experimental investigation of the metabolic carbon dioxide propagation within a room”. Oral Presentations of the “*Clima 2010, 10th Rehva World Congress of Sustainable Energy Use in Buildings*”, Antalya (Turquia), 9-12 Maio de 2010.
- Comissão da União Europeia (2010), “Europa 2020: a Comissão propõe uma nova estratégia económica para a Europa”, acedido em 20 de Maio de 2011 em: <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/10/225&format=HTML&aged=0&language=PT&guiLanguage=en>.

- Comissão da União Europeia (2011), “Plano de Eficiência Energética de 2011”, acessado em 20 de Maio de 2011 em: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0109:FIN:PT:PDF>.
- Corgnati, S. P., Gameiro da Silva, M. (Editors) (2011), “Indoor Climate Quality Assessment”, *REHVA Guidebook 14*.
- Daghigh, R., Adam, N. M., Saharib, B. (2009), “The effect of Air Exchange Rate on Human Thermal Comfort in a Air-Conditioned Office Under Different Opening Arrangements”. *European Journal of Scientific Research*, Volume 25, 2 (2009), 174-191.
- de Gids, W. F., Wouters, P. (2010), “CO₂ as Indicator for the Indoor Air Quality, general Principles”. AIVC, IP 33, acessado a 18 de Maio de 2013 em <http://www.aivc.org/Publications/Vips/VIP33.htm>
- Dorer, V., Tanner, C., Weber, A. (2004), “Airtightness of buildings”. AIVC, IP 8, acessado a 4 de Março de 2011 em <http://www.aivc.org/Publications/Vips/VIP08.htm>
- Ekberg, L., Kraenzmer, M. (1998), “Determination of ventilation rates by CO₂ Monitoring: Assessment of Inaccuracies”. Proceedings of the “*Roomvent 1998, 6th International Conference on Air Distribution in Rooms*”, Estocolmo (Suécia), 14-17 Junho de 1998.
- El Mankibi, M., Stathopoulos, N., Michel, P. (2011), “Natural Ventilation Potencial Improving Indoor Air Quality: Experimental and Numerical Studies”. Proceedings of the “*ISHVAC 2011*”, Changhai (China), 6-9 de Novembro de 2011.
- EPBD (2002), “Directiva 2002/91/EC do Parlamento Europeu e do Conselho” de 16 de Dezembro 2002 sobre o desempenho energético de edifícios. *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*, 4 de Janeiro de 2003, pp. L1/65-L1/71.
- EPBD recast (2010), “Directiva 2010/31/EU do Parlamento Europeu e do Conselho” de 19 de Maio 2010 sobre o desempenho energético de edifícios. *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*, pp. L153/13-L153/35.
- Erhorn-Kluttig, H., Erhorn, H., Lahmidi, H., Anderson, R. (2009), “Airtightness requirements for high performance building envelopes”. “*30th AIVC conference on Trends in high Performance Buildings and the role of Ventilation and 4th International Symposium on Building and Ductwork Air tightness*”, Berlin (Alemanha), 1-2 de Outubro de 2009.
- Eurostat (2010), “EU energy and transport in figures”, acessado em 16 de Abril de 2011 em http://ec.europa.eu/energy/publications/statistics/statistics_en.htm
- Gameiro da Silva, M. (2009), “Virtual Laboratories for a Course on Indoor Environmental Quality”. *iJOE*, Volume 5, Special Issue 2, 20-26.

- Gameiro da Silva, M., Costa, J., Gaspar, A., Paulino, A., Bento, M., Botte, G. (2011), “The Influence of Wind on the Infiltration Rates in a Web-based Monitored Office Building”. Proceedings of the “*Roomvent 2011, 12th International Conference on Air Distribution in Rooms*”, Trondheim (Noruega), 19-22 Junho.
- Gameiro da Silva, M., Costa, J., Neves, L. F., Pereira, A. C. (2010), “Simultaneous Measurements of CO₂, Radon and Thermal Parameters in a Bank Agency”. Oral Presentations of the “*Clima 2010, 10th Rehva World Congress of Sustainable Energy Use in Buildings*”, Antalya (Turquia), 9-12 Maio de 2010.
- Gameiro da Silva, M.; Costa, J. J.; Ramos, E. P. (2011), "On the definition of ventilation requirements in IAQ standards – A method based on emission rates of pollutants", Proceedings of the “*Climamed 2011, 11th Mediterranean Congress of Climatization*”, Madrid (Espanha), 2-3 Junho de 2011.
- Gameiro da Silva, M., Paulino, A., Bento, M., Góis, M., Botte, G., Valentim, R., Gomes, J., Fonseca, R. (2010), “A wireless network web-based monitoring solution for indoor environmental quality and energy performance assessment of buildings“. Oral Presentations of the “*Clima 2010, 10th Rehva World Congress of Sustainable Energy Use in Buildings*”, Antalya (Turquia), 9-12 Maio de 2010.
- ISO (2010), EN ISO 12569 - “Thermal performance of buildings and materials – determination of specific airflow rate in buildings –tracer gas dilution”.
- ISO/IEC (2007), “Vocabulário Internacional de Metrologia ” (3^a ed.), IPQ (2008- 1^o ed. portuguesa),
- Iwashita, G., Akasaka, H. (1997), “The effects of human behaviour on natural ventilation rate and indoor air environment in summer – a field study in southern Japan”. *Energy and Buildings*, 25 (1997), 195-205.
- Jardinier, M., Berthin, S., Labaume, D., Bernard, A., Boxberger, J., Blazy, M., Prigent, H., Petit, F., Daliphard, J., Berger, P., Berthault, S., Rémi Carrié, F., Jobert, R., Ginestet, A., Barbat, M., Chapuis, D., Bonada, F., Barles, P. (2006), “Réussir l’étanchéité à l’air de l’enveloppe et des réseaux: Elaboration et application d’une démarche qualité”. *Département de Villes et Territoires - Cete de Lyon* acedido a 17 de Fevereiro em: http://www.cete-lyon.equipement.gouv.fr/article.php3?id_article=234
- Jardinier, M., Savin, J. L., Berthin, S. (2008), “Demand Controlled Ventilation: Conciliating Indoor Air Quality and Energy Savings”, acedido em 20-11-2012 em http://www.aereco.com/wp-content/uploads/2012/06/Proceeding-AIVC-Kyoto_2008_GB-demand-controlled-ventilation.pdf

- Kajtár, L., Leitner, A., Bánhidi, L. (2006), “Evaluation of IAQ in residential kitchens based on laboratory and field studies”. Proceedings of the “*Healthy Buildings 2006, Conference on Creating a Healthy Indoor Environment for People*”, Lisboa (Portugal), 4-8 de Junho de 2006.
- Liddament, M. (1986), “Air Infiltration Calculations Techniques – an Applications Guide”. *IEA Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme*, AIVC.
- Liddament, M. (1996), “A Guide to Energy Efficient Ventilation”, *IEA Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme*, AIVC.
- Mahyuddin, N., Awbi, H., (2010), “The spatial distribution of carbon dioxide in an environmental test chamber”. *Building and Environment*, 45 (2010), 1993-2001.
- Montoya M. I., Pastor, E., Planas, E. (2011), “Air infiltration in Catalan dwellings and sealed rooms: An experimental study”. *Building and Environment* (2011), doi:10.1016/j.buildenv.2011.04.009.
- Montoya, M. I., Pastor, E., Rémi Carrié, F., Guyot, G., Planas, E. (2010), “Air leakage in Catalan dwellings: Developing an airtightness model and leakage airflow predictions”. *Building and Environment*, 45 (2010), 1458–1469.
- Moret Rodrigues, A., Canha da Piedade, A., Braga, A. (2009), “Térmica de Edifícios” (1ª ed.), Edições Orion.
- Naydenov K., Barankova P., Sundell J., Melikov A. (2007), “Distribution of carbon dioxide produced by people in a room: part 2 - field study”. Proceedings of the “*Roomvent 2007, 10th International Conference on Air Distribution in Rooms*”, Helsínquia (Finlândia), 13-15 de Junho de 2007.
- Nicol, F., Wilson, M. (2010), “An overview of the European Standard EN 15251”. Proceedings of Conference “*Adapting to Change: New Thinking on Comfort*”, Windsor (Reino Unido), 9-11 de Abril de 2010.
- Oie, L., Stymne, H., Boman, C. A., Hellstrand, V. (1998), “The Ventilation Rate of 344 Oslo Residences.” *Indoor Air*; 8, 190-196.
- Persily, A. (1997), “Evaluating Building IAQ and Ventilation with Indoor Carbon Dioxide”, acessado em 5-11-2012 em <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build97/PDF/b97044.pdf>
- Persily, A., Musser, A., Emmerich, S. J. (2010), “Modeled infiltration rate distributions for U.S. housing”. *Indoor Air*, 20 (2010), 473–485.
- Pinto, M., Boman, C., Stymne, H., Freitas, V. (2003), “Air change rates in multi-family residential buildings in northern Portugal”. Proceedings of the “*Healthy Buildings*

- 2003, *Conference on Energy-Efficient Healthy Buildings*“, Singapura, 7-11 de Dezembro de 2003.
- RCCTE (2006), “Decreto-Lei no 80/2006” de 4 de Abril sobre o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios. *Diário da República*, 4 de Abril de 2006, I Série-A, No 67.
- Ridley, I., Fox, J., Oreszczyn, T., Hong, S. H. (2003), “The Impact of Replacement Windows on Air Infiltration and Indoor Air Quality in Dwellings”. *International Journal of Ventilation*, Volume 1, 3 (2003), 209-218.
- Roijen, E., Veld, P., van der Aa, A. (2010), “Performances of New Innovative Domestic Ventilation Systems in Combination with Low Temperature Floor Heating”. *31th AIVC International Conference*, Seul (Coreia do Sul), 26-28 de Outubro de 2010
- Santamouris M., Argiroudis K., Georgiou M., Pavlou, K., Doukas P., Assimakopoulos M., Sfakianaki, K. (2007), “Indoor air quality in fifty residences in Athens”. *International Journal of Ventilation*, Volume 5, 4 (2007), 367-80.
- Santamouris, M., Synnefa, A., Assimakopoulos, M., Livada, I., Pavlou, K., Papaglastra, M., Gaitani, N., Kolokotsa, D., Assimakopoulos, V. (2008), “Experimental investigation of the air flow and indoor carbon dioxide concentration in classrooms with intermittent natural ventilation”. *Energy and Buildings*, 40 (2008), 1833–1843.
- Santos, J. (2008), “Avaliação experimental dos níveis de Qualidade do Ar Interior em Quartos de Dormir”. *Tese de Mestrado*, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa (Portugal).
- Seppänen, O. A., Fisk, W. J. (2004), “Summary of human responses to ventilation.” *Indoor Air* 14, Suppl 7, (2004), 102-18.
- Sfakianaki, A., Pavlou, K., Santamouris, M., Livada, I., Assimakopoulos, M., Mantas, P., Christakopoulos, A. (2008), “Air tightness measurements of residential houses in Athens, Greece”. *Building and Environment*, 43 (2008), 398-405.
- Sherman, M. (1990), “Tracer-gas Techniques for Measuring Ventilation in a Single Zone”. *Building and Environment*, 25 (4), 365-374.
- Sherman, M. (1998), “Air Infiltration measurements techniques”, acessido em 17-06-2011 em: <http://epb.lbl.gov/publications/lbl-27656.pdf>
- Silva, A. (1991), “Caracterização das Infiltrações Médias Anuais em Edifícios Portugueses Através do Método de Pressurização”. *Tese de Mestrado*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto (Portugal).

- Stavova (Barankova) P., Melikov A. K., Sundell J., Drkal, F. (2006), “Validation of a CO₂ method for ventilation measurement in dwellings – laboratory study”. Book of Abstracts of the “*Healthy Buildings 2006, Conference on Creating a Healthy Indoor Environment for People*”, Lisboa (Portugal), 4-8 de Junho de 2006.
- Stavova (Barankova) P., Melikov A. K., Sundell J., Naydenov K. G., (s/data), “Air change rate measurement in an apartment by CO₂ method”, acedido em 9 de Abril de 2011 em: <http://utp.fs.cvut.cz/vz/clanky/71.pdf>
- Stavova P., Melikov A. K., Naydenov K. G., Sundell J. (2007), “A study on distribution of carbon dioxide produced by people in 3 residential buildings”. Book of Abstracts of the “*Roomvent 2007, 10th International Conference on Air Distribution in Rooms*”, Helsínquia (Finlândia), 13-15 de Junho de 2007.
- Sundell, J. (2004), “On the history of indoor air quality and health”. *Indoor Air* 14, Suppl 7 (2004), 51-58.
- Tamura, G. T., Wilson, A. G. (1963), “Air leakage and pressure measurements on two occupied houses”. Reprint from the *ASHRAE Journal* 12, vol.5 (1963), 65-73.
- Viegas, J. C., Marques da Silva, F., Matias, L., Pinto, A. (2002), “Assessment of the performance of natural ventilation in na apartment building”. Proceedings of the “*Roomvent 2002, 8th International Conference on Air Distribution in Rooms*”, Copenhagen (Dinamarca), 8-11 Setembro de 2002.
- Wallace, L. A., Emmerich, S. J., Howard-Reed, C. (2002), “Continuous measurements of air change rates in an occupied house for 1 year: The effect of temperature, wind, fans, and windows”. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 12 (2002), 296-306.
- You, Y., Bai, Z., Jia, C., Wan, Z., Ran, W., Zhang, J. (2007), “Measuring air exchange rates using continuous CO₂ sensors”. Proceedings of the “*Clima 2007, 9th Rehva World Congress on Wellbeing Indoors*”, Helsínquia (Finlândia), 10-14 de Junho de 2007.

Outros:

- Aires, Luís (2010), “Conceitos de Matemática – Fundamentos para as Ciências da Vida” (1^a ed. -3^a impressão), Edições Sílabo
- Oliveira, L.A. (2011), “Dissertação de Tese em Ciência e Tecnologia” (1^a ed.), LIDEL
- Çengel, Y., Turner, R., Cimbala, J. (2008), “Fundamentals of Thermal – Fluid Sciences” (Third Edition), McGraw Hill