AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA TAXA DE RENOVAÇÃO DE AR DE UMA CASA POPULAR EM PALMAS-TO UTILIZANDO O MÉTODO DO GÁS TRAÇADOR

Murilo Marcolini (1); Eva Barreira (2); Ricardo Almeida (3)
(1) Mestre, Doutorando do Programa em Engenharia Civil da FEUP, murilomarcolini@gmail.com, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal
(2) PhD, Professora Auxiliar, barreira@fe.up.pt, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal
(3) PhD, Professor Adjunto, ralmeida@estgv.ipv.pt, Instituto Politécnico de Viseu, Portugal

RESUMO
A ventilação dos edifícios desempenha duas funções fundamentais: garante a entrada de ar fresco e limpo melhorando a qualidade do ar no interior dos edifícios e promove o varrimento dos poluentes que se encontram no seu interior. Conhecer e quantificar a ventilação de um edifício é o primeiro passo para um correto controle e definição da sua estratégia de utilização mais adequada. A técnica mais comum para medir as taxas de ventilação assenta na utilização de um gás traçador. Neste trabalho mediram-se as renovações horárias em uma casa popular através do método do gás traçador e da técnica do declive. Para esse fim foram realizados cinco ensaios, permitindo avaliar a variabilidade dos resultados. Os resultados mostraram que é necessário realizar vários ensaios para aumentar o seu nível de confiança, uma vez o coeficiente de variação atingiu os 19%. O valor médio de renovações horárias foi de 1,16 h^{-1}, o que pode ser considerado elevado, tendo em conta que se trata apenas de infiltração de ar.

Palavras-chave: método do gás traçador, técnica do declive, ventilação natural.

ABSTRACT
The ventilation of buildings has two fundamental objectives for the maintenance or promotion of air quality inside environments: to guarantee the entry of fresh and clean air inside the buildings and to promote the exit of pollutants that are inside. Understanding and quantifying the ventilation of a building is the first step towards a correct control and definition of its most appropriate use strategy. The most common technique for measuring ventilation rates is based on the use of a tracer gas. In this work, the air change rate of a popular house was measured using the tracer gas method and the decay technique. For this purpose, five experiments were carried out, allowing to evaluate the variability of the results. The results showed that it is necessary to carry out several tests to increase its level of confidence, once the coefficient of variation reached 19%. The average air change rate was 1.16 h^{-1}, which can be considered high, considering that it corresponds only to air infiltration.

Keywords: tracer gas method, decay technique, natural ventilation.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, garantir as adequadas condições de conforto no interior dos edifícios, necessárias a uma boa qualidade de vida, é um imperativo para a comunidade técnica e científica. As elevadas taxas de permanência em espaços interiores, características nos hábitos das sociedades modernas, maximizam a importância de garantir níveis elevados de qualidade do ambiente interior (WARGOCKI, 2009). Neste domínio, a ventilação dos edifícios assume um papel fundamental. A ventilação dos edifícios desempenha duas funções fundamentais: garante a entrada de ar fresco e limpo no interior dos edifícios (sempre que o ar exterior não se encontra contaminado) e promove o varrimento dos poluentes que se encontram no seu interior. Taxas de ventilação insuficientes são causadoras de baixa produtividade e contribuem para o surgimento de doenças do foro respiratório, relacionadas com a baixa qualidade do ar interior. A ventilação é um parâmetro fundamental para o ambiente interior de um edifício, com impacto óbvio no controle da qualidade do ar interior sendo, contudo, necessário equilíbrio entre as necessidades energéticas de climatização e as condições de conforto térmico interior.

Barbirato (2020) em recente artigo intitulado "Arquitetura, Urbanismo e Conforto Ambiental: Reflexões em tempos de Pandemia" trouxe à baila a importância do uso, entre outros, da ventilação natural e arejamento dos ambientes no tratamento durante gripe espanhola, doença pandêmica no início do século XX, indicando a necessidade de proposições arquitetônicas que "salvem" a cidade sem restringir a circulação necessária, o lugar de encontros e a salubridade de seus espaços externos e de convívio, dentro desse novo e instável panorama urbano de possíveis pandemias, com base em princípios bioclimáticos de configuração dos espaços.

Sancho *et al.* (2021) apontou a ventilação natural como possibilidade de auxilio no controle de infecção hospitalar "ao garantir a renovação do ar nos ambientes onde não há obrigatoriedade do uso de sistemas de ar condicionado, além de reduzir a demanda de energia e proporcionar conforto térmico aos usuários".

Para além do óbvio impacto na qualidade do ar interior, a ventilação dos edifícios está ainda altamente relacionada com o seu desempenho energético. Por um lado, em climas frios, a ventilação é uma das principais causas de perda de calor, devendo, portanto, ser minimizada (KALAMEES, 2007); por outro lado, em climas quentes, pode ser uma alternativa passiva para o varrimento das cargas térmicas e consequente arrefecimento dos espaços interiores (SHAVIV *et al*., 2001).

O diferencial de pressão que induz a ventilação natural pode ocorrer por ação dos ventos, efeito chaminé ou por esses dois processos combinados: a ação do vento provoca escoamentos de ar no exterior do edifício, que resultam em aumentos ou reduções de pressão relativamente à pressão atmosférica; o efeito chaminé ocorre devido à diferença de massa volúmica, e consequentemente de pressão estática, resultantes de diferenças de temperatura entre o ar interior e o ar exterior (AWBI, 2003). A pressão do vento nas superfícies depende da sua direção e velocidade, da densidade do ar, da orientação da superfície e das condições/obstáculos que existem na envolvente além do tipo de terreno e o entorno imediato à edificação. O efeito chaminé aumenta quando o gradiente de temperatura entre o interior e o exterior também aumenta e quando os edifícios são mais altos. O efeito do vento é predominante na ventilação natural qundo a sua velocidade é superior a 3 m/s (CARDOSO, *et al*., 2020).

Existem duas estratégias principais de ventilação natural: a ventilação cruzada horizontal e a ventilação cruzada vertical. A horizontal, ocorre quando existem no mínimo duas aberturas em lados opostos dos ambientes, permitindo a completa circulação do ar. O posicionamento das aberturas deve ser selecionado tendo em conta a incidência dos ventos dominantes de cada região. A ventilação cruzada vertical permite retirar o ar quente que se acumula nas partes mais elevadas do interior dos edifícios, por intermédio de um fluxo de ar ascendente gerado por aberturas em diferentes níveis em faces opostas ou adjacentes (GIVONI, 1962).

Medir com precisão as taxas de ventilação pode ser uma tarefa complexa. A técnica mais comum para medir as taxas de ventilação assenta na utilização de um gás traçador. No entanto, em condições muito específicas, como em edifícios muito estanques, onde os fluxos de ar ocorrem quase exclusivamente em ductos, métodos baseados na medição da velocidade do ar podem ser uma boa alternativa para estimar as vazões de ventilação (PERSILY, 2016). Relativamente à infiltração de ar (trocas de ar não controladas), o procedimento mais comum para a sua medição é o ensaio de porta ventiladora, que se baseia na pressurização/despressurização gradual dos espaços e medição da respetiva vazão de ar (ALMEIDA *et al*., 2020). Este ensaio pode ser combinado com uma inspeção termográfica do edifício para facilitar a deteção dos locais onde ocoerem as infiltrações de ar (BARREIRA *et al*., 2017).

A cidade de Palmas-TO, localizada no centro do Brasil, caracteriza-se por apresentar uma temperatura elevada durante todo o ano, que condiciona as condições de conforto térmico no interior dos edifícios. A solução óbvia passa pela utilização de sistemas de ar condicionado, com consequências evidentes no

desempenho energético do edifício. Nestes contextos, as preocupações com a eficiência energética centram-se no controlo das necessidades de arrefecimento para garantia das condições de conforto térmico, devendo previligiar-se estratégias de resfriamento passivo, como, em determinadas circunstâncias, o aproveitamento da ventilação, diurna e/ou noturna. Assim, conhecer e quantificar a ventilação de um edifício é o primeiro passo para um correto controlo e definição da sua estratégia de utilização mais adequada.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo principal medir as renovações horárias (RPH) em uma casa popular através do método do gás traçador e da técnica do declive. Para tal foram realizados cinco ensaios e avaliada a respectiva variabilidade.

3. MÉTODO

3.1. Método do gás traçador – Técnica do declive

Para a determinação da vazão de renovação de ar recorreu-se ao Método do Gás Traçador e à Técnica do Declive. Este procedimento assenta na medição ao longo do tempo da concentração de um gás traçador, previamente introduzido no espaço. Esse gás deve ser pouco comum na atmosfera e obedecer a determinados requisitos, nomeadamente (ETHERIDGE E SANDBERG, 1996): i) não deve ser um constituinte habitual do ambiente que está a ser estudado; ii) deve ser facilmente mensurável, incluindo a baixas concentrações; iii) não deve ser tóxico nem trazer qualquer risco para a saúde; iv) deve ser não inflamável e não explosivo; v) não deve ser dispendioso; vi) deve ser ambientalmente inerte.

O procedimento experimental para a determinação da vazão de ventilação através do Método do Gás Traçador e da Técnica do Declive está regulamentado pelas normas ISO 12569 (ISO, 2000) e ASTM E741-00 (ASTM, 2000).

Em termos matemáticos, a variação temporal da concentração de um gás numa determinada zona depende de três componentes: i) concentração do gás no ar admitido; ii) concentração do gás no ar extraído e iii) produção interna do gás. A equação diferencial (Equação 1) que traduz este fenómeno é a seguinte:

$$V \cdot \frac{dC(t)}{dt} = G + Q \cdot C_{ex} - Q \cdot C(t) \qquad \text{(Equação 1)}$$

Em que

V	[m^3]	Volume
C(t)	[ppm]	Concentração do gás
t	[s]	Tempo
G	[cm^3/s]	Produção interna do gás
Q	[m^3/s]	Vazão de ventilação
C_{ex}	[ppm]	Concentração do gás no exterior

A solução da equação (1) pode ser obtida por integração (Equação 2), resultando:

$$C(t) = C_{ex} + \frac{G}{Q} + \left(C_{in} - C_{ex} - \frac{G}{Q} \right) \cdot e^{-\frac{Q}{V} \cdot t} \qquad \text{(Equação 2)}$$

Em que

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

Uma vez que o gás traçador deve possuir concentrações residuais ou nulas no ar exterior e interior (abaixo das utilizadas nos ensaios), pode desprezar-se na equação (2) a parcela referente ao ar exterior. Portanto, a solução desta equação pode ser simplificada para (Equação 3):

$$C(t) = \frac{G}{Q} + \left(C_{in} - \frac{G}{Q} \right) \cdot e^{-\frac{Q}{V} \cdot t} \qquad \text{(Equação 3)}$$

Como também não existe produção interna do gás traçador no espaço em estudo, a solução final da equação (1) é (Equação 4):

$$C(t) = C_{in} \cdot e^{-\frac{Q}{V} \cdot t} \qquad \text{(Equação 4)}$$

Rearranjando esta última equação, obtém-se (Equação 5):

$$\frac{Q}{V} = RPH = \frac{\ln\left(\frac{C_{in}}{C(t)}\right)}{t} \qquad \text{(Equação 5)}$$

Em que

RPH [h^{-1}] Renovações horárias

Assim, para o cálculo das infiltrações ou vazão de ventilação em espaços que podem ser considerados como uma única zona, é suficiente introduzir um gás traçador até se atingir uma concentração inicial uniforme, C_{in}. Então, basta registar a evolução da concentração desse gás com o tempo, que num gráfico *ln(C) versus* tempo, pela equação (5), é uma reta (Figura 1). O módulo do declive desta reta, *Q/V*, é a incógnita que permite o cálculo das renovações horárias, *RPH*.

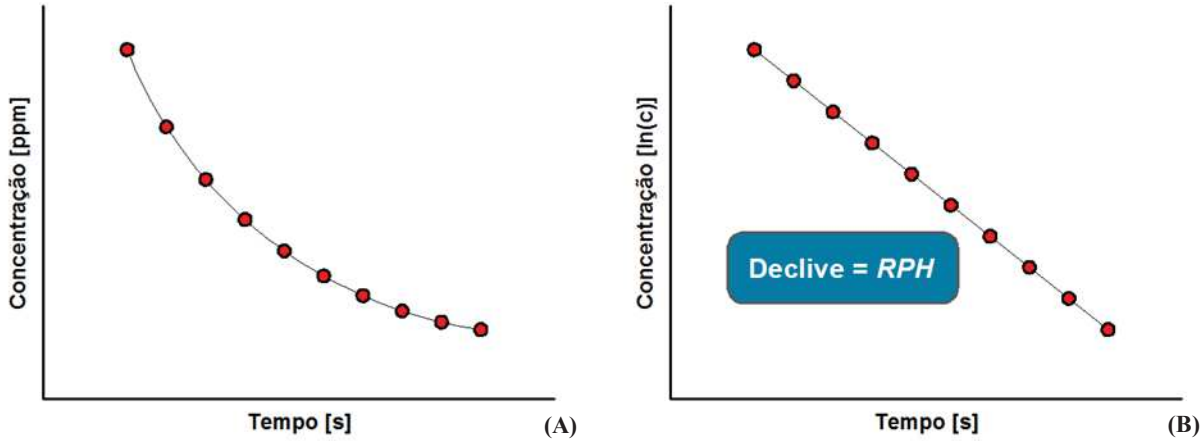


Figura 1- Exemplo da Técnica do Declive. a) decaimento do gás traçador; b) gráfico do logaritmo da concentração *versus* tempo (adaptado de AWBI, 2003).

A metodologia também pode ser aplicada quando se utiliza o dióxido de carbono (CO_2) como gás traçador. Neste caso, algumas adaptações têm de ser introduzidas na metodologia prescrita na ASTM E741-00, as quais vêm indicadas na norma ASTM D6245-12 (ASTM, 2012). A principal está relacionada com a concentração de CO_2 presente na atmosfera, a qual não é desprezável, contrariamente à hipótese formulada na análise à equação (4). No entanto, desde que a concentração de CO_2 no exterior se mantenha constante durante o ensaio, o método do gás traçador e da técnica do declive ainda podem ser aplicados, tendo o cuidado de substituir a concentração interior prevista na ASTM E741-00 pela diferença entre a concentração interior e a concentração exterior. Adicionalmente, dado que este método prevê que a geração interna de gás traçador é nula, os ocupantes do espaço têm de o abandonar antes do início do ensaio.

Foram realizados cinco ensaios, permitindo avaliar a variabilidade dos resultados. A informação obtida neste trabalho será utilizada futuramente na definição de estratégias passivas de resfriamento com o objetivo de otimizar as condições de conforto destas casas.

3.2. Caso de estudo

O edifício selecionado com caso de estudo foi uma casa popular localizada em Palmas-TO (10° 15’ 50” S, 48° 20’ 12” W) (Figura 1 A). Seguindo a arquitetura típica destes edifícios, a habitação possui uma área total de 37,11 m² e apresenta quatro ambientes: sala de estar/cozinha, dois quartos e um banheiro. Apesar da

metodologia adotada ser limitada a espaços de uma única zona, considera-se que a reduzida dimensão do espaço e o fato das portas interiores estarem sempre abertas durante o ensaio, permite aproximar o comportamento da fração ao de uma única zona.

Uma vez que o gás traçador foi o dióxido de carbono (CO_2), as medições decorreram com a residência sem qualquer ocupação. O gás traçador (CO_2) foi libertado no local através de um extintor uniformemente em todos os comportamentos, procurando-se sempre obter uma mistura o mais homógenea possível. A libertação do gás foi feita junto aos três ventiladores de teto, localizados um em cada quarto e outro na sala de estar, para facilitar a mistura, como evidenciado na Figura 1 (B).

O equipamento para a medição da concentração de CO_2 (medidor / data logger) ficou posicionado na sala de estar, próximo do centro geométrico da casa e próximo das portas de ligação dos ambientes. A posição do equipamento está representada na Figura 1 (B).

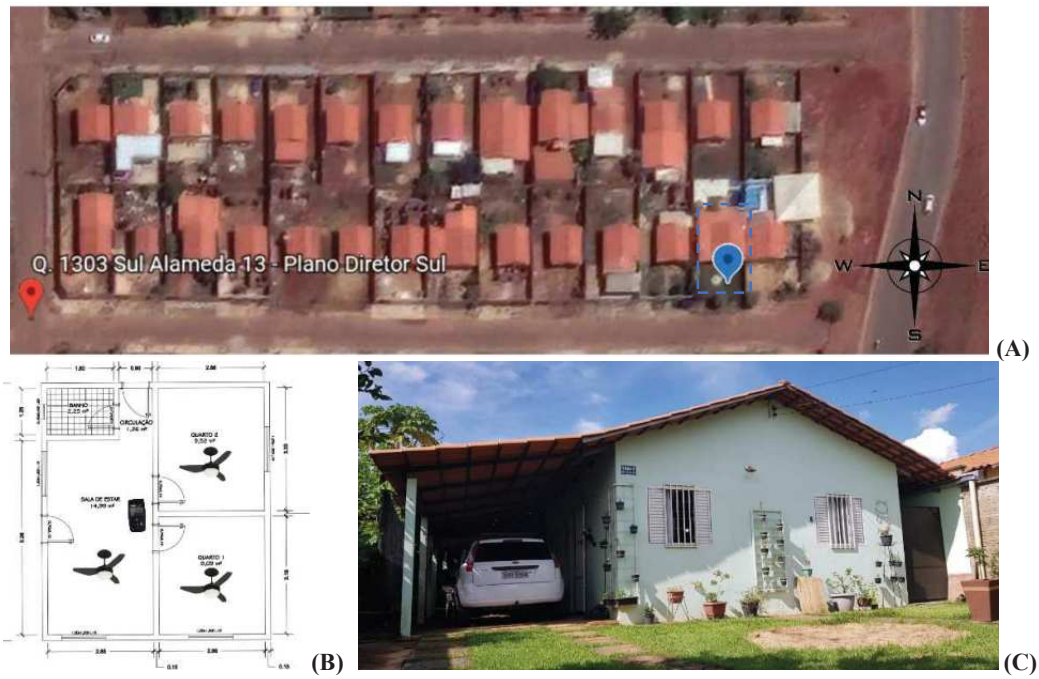


Figura 2- Local do ensaio: (A) Localização da casa (Google Earth); (B) Planta; (C) Habitação in loco.

Em termos construtivos, as paredes exteriores da casa são construídas com uma alvenaria convencional. Os pisos são de materiais cerâmicos e os forros do tipo PVC. Relativamente aos vãos, as janelas são do modelo venezianas de correr de aço e as portas são de abrir veneziana de aço (Figura 3).

A metodologia adoptada inclui a realização de cinco ensaios em condições idênticas, permitindo, assim, avaliar uma eventual variabilidade associada quer às condições de ensaio, quer ao próprio procedimento (incluindo o fato de se estar a assumir uma única zona). Deste modo, aumenta-se a robustez da metodologia e o consequente grau de confiança nos resultados.

Durante os cinco ensaios foi também registada a temperatura e a umidade relativa do ar. A temperatura média em todos os ensaios foi de 28,43 °C, enquanto que a umidade relativa média foi de 74,63%. O quadro da Figura 4 mostra o valor da temperatura e da umidade relativa por ensaio, verificando-se que as condições se encontram muito semelhantes nos cinco ensaios.



Figura 3- Porta, janela, piso e forro da construção.

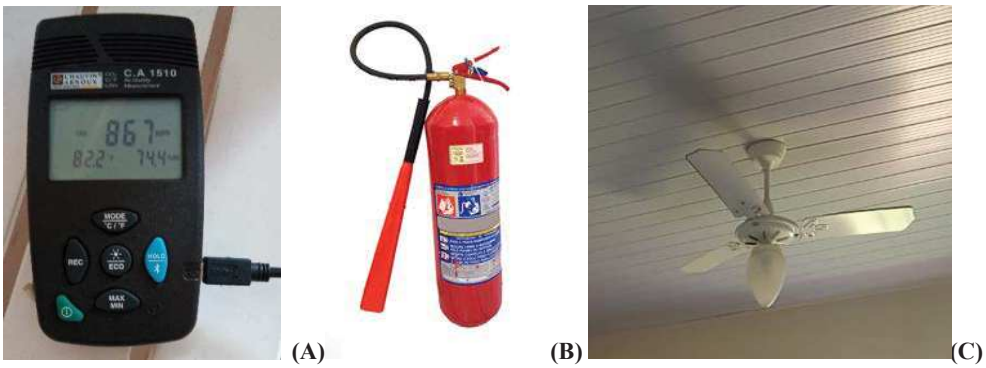
Ensaio	Horário	Méd. Temperatura (ºC)	Méd. Umidade Relativa (%)
1	9h 17	28,52	73,73
2	9h 14	26,97	74,92
3	11h 50	28,45	74,15
4	13h 34	29,14	75,34
5	15h 46	29,06	75,00
	Méd. Total	28,43	74,63

Figura 4- Níveis de temperatura e umidade conforme horário e ensaio realizado.

3.2. Equipamentos utilizados

Para este estudo foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Medidor da concentração de dióxido de carbono, temperatura e umidade relativa / Data Logger – Modelo Chauvin Arnoux CA 1510. Este equipamento foi usado para monitoramento da concentração de CO_2, da temperatura e da umidade relativa do ar (Figura 5 A). O equipamento apresenta as seguintes precisões: ± 50 ppm ou ± 3 % do valor medido, ± 0.5 °C e ± 2 %, respetivamente para a medição da concentração de CO_2, da temperatura e da umidade relativa do ar. As resoluções são as seguintes: 1 ppm, 0,1 ºC e 0,1%.
- Extintor de CO_2 – utilizou-se um equipamento portátil para libertar dióxido de carbono (Figura 5 B).
- Ventiladores de teto. Foram utilizados os três ventiladores de teto já existentes na casa para facilitar a distribuição do gás traçador nos ambientes, garantindo-se, desta forma, uma mistura homógenea do ar (Figura 5 C).



(A) **(B)** **(C)**

Figura 5- Equipamentos utilizados: (A) Sensor / Data-logger (concentração de CO_2, temperatura e umidade relativa); (B) Extintor de CO_2; (C) Ventilador de teto.

4. RESULTADOS DOS ENSAIOS E DISCUSSÃO

Todos os ensaios tiveram uma duração superior a uma hora. A Figura 6 mostra o decaimento do logaritmo da concentração de dióxido de carbono ao longo dos cinco ensaios. Destaca-se, desde logo, que em todos os

ensaios se obteve um bom ajuste linear ao decaimento do logaritmo da concentração de dióxido de carbono, sempre com um coeficiente de determinação, R^2, superior 0.97. A partir do valor das renovações horárias, foi estimado a vazão de ventilação, sabendo que o volume interior da casa é de 111,3 m^3.

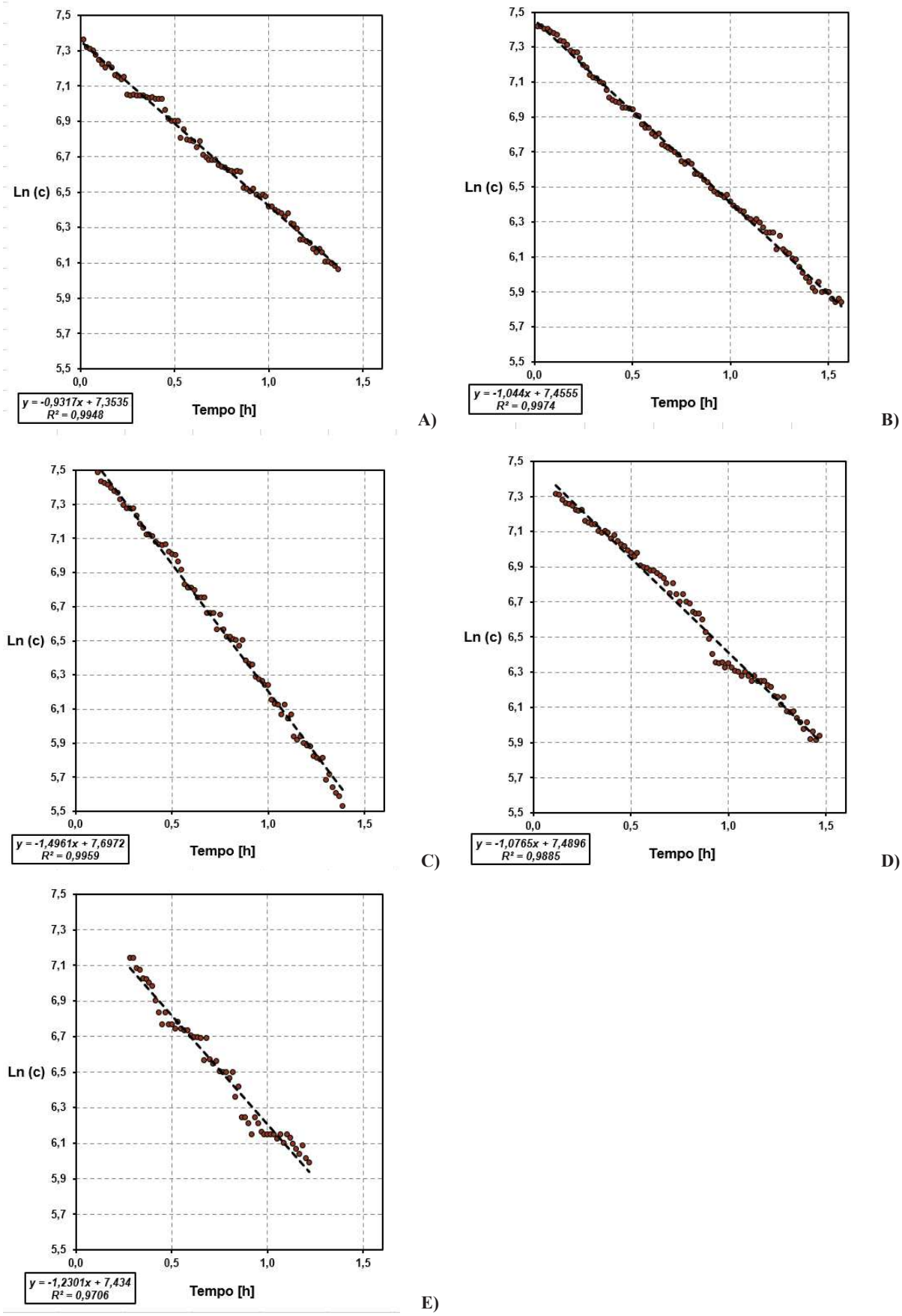


Figura 6- Variação do logaritmo da concentração de dióxido de carbono ao longo do período de ensaio: (A) ensaio 1; (B) ensaio 2; (C) ensaio 3; (D) ensaio 4; e (E) ensaio 5.

A Figura 7 mostra os resultados obtidos nos cinco ensaios, incluindo a renovação horária e o respetivo vazão de ventilação. Apresenta-se ainda o valor da média, desvio padrão e coeficiente de variação das duas grandezas.

	RPH (h^{-1})	Vazão (m^3/h)
Ensaio 1	0,93	103,5
Ensaio 2	1,04	115,8
Ensaio 3	1,50	167,0
Ensaio 4	1,08	120,2
Ensaio 5	1,23	136,9
Média	1,16	128,7
Desvio Padrão	0,22	24,5
Coef. de variação	19%	

Figura 7- Resultados do RPH de todos os ensaios realizados.

O valor médio das renovações horárias foi de 1,16 h^{-1}. Trata-se de um valor médio elevado, tendo em conta que se trata exclusivamente de infiltração de ar, uma vez que a casa não dispõem de nenhum dispositivo específico de ventilação (quer para a admissão, quer para a extração de ar). Nesse sentido, poderá ocorrer uma perda de eficiência dos sistemas de climatização que venham a ser instalados.

Por outro lado, confirmou-se que a confiança nos resultados está dependente do número de ensaios realizados, uma vez que a variabilidade encontrada tem algum significado. O coeficiente de variação dos resultados dos cinco ensaios foi de 19%. Diferentes aspetos podem ter contribuído para esta variabilidade, nomeadamente: diferenças em termos de condições fronteira, ou seja, no gradiente de temperatura entre o interior e o exterior e variações na direção e velocidade do vento; dificuldades em homogeneizar a mistura do ar no interior da fração, devido às condições geométricas do espaço que condicionam os fluxos de ar, podendo resultar num comportamento diferente do de uma única zona; e a combinação destes fatores.

5. CONCLUSÕES

A ventilação é um parâmetro fundamental para o desempenho dos edifícios, com impacto direto na saúde dos utilizadores, no nível de conforto térmico das habitações, no desempenho energético dos edifícios e, também, na própria durabilidade das construções. Assim, conhecer e quantificar a ventilação de um edifício é o primeiro passo para um correto controlo e definição da sua estratégia de utilização mais adequada. Este trabalho tem por objetivo principal medir as renovações horárias numa casa popular através do método do gás traçador e da técnica do declive. Para esse fim foram realizados cinco ensaios, permitindo avaliar a variabilidade dos resultados.

A partir dos resultados é possível tecer as seguintes considerações:

- A técnica do declive pode ser utilizada para determinar as renovações horárias em casas populares, embora devam ser realizados vários ensaios para aumentar o nível de confiança nos resultados;
- A variabilidade nos resultados pode resultar de diferenças em termos de condições fronteira (gradiente de temperatura interior/exterior e vento), de dificuldades em homogeneizar a mistura do ar no interior da fração, podendo resultar num comportamento diferente do de uma única zona, ou da combinação destes fatores;
- O valor médio de renovações horárias é elevado, tendo em conta que se trata de infiltração de ar, apontando para uma perda de eficiência dos sistemas de climatização que venham a ser instalados.

A informação obtido neste trabalho será utilizada futuramente na definição de estratégias passivas de resfriamento, com o objetivo de otimizar as condições de conforto destas casas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, R.M.S.F., BARREIRA, E., MOREIRA, P., **A discussion regarding the measurement of ventilation rates using tracer gas and decay technique**, Infrastructures, 2020, 5(10), 85.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **E 741-00 - Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution**. ASTM, West Conshohocken, USA, 2000.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D6245-12 - Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation**. ASTM, West Conshohocken, USA, 2012.

AWBI, H., **Ventilation of Buildings**, 2nd Edition, E & FN Spon, 2003.

BARBIRATO, G. M., **Arquitetura, urbanismo e conforto ambiental: reflexões em tempos de pandemia**. Revista Ímpeto, n. 10, 2020.

BARREIRA, E.; ALMEIDA, R.M.S.F.; MOREIRA, M. **An infrared thermography passive approach to assess the effect of leakage points in buildings**. Energy and Buildings, 2017, 140, 224-235.

CARDOSO, V.E.M., PEREIRA, P.F., RAMOS, N.M.M., ALMEIDA, R.M.S.F., **The impacts of air leakage paths and airtightness levels on air change rates**, Buildings, 2020, 10(3), 55.

GIVONI, B., **Basic study of ventilation problems in housing in hot countries**. Israel: Building Research Station Technion. Report of the Israel Institute of Technology, 1962.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 12569 - Thermal Performance of Buildings, Determination of Air Change in Buildings - Tracer Gas Dilution Method**. ISO, Genève, Switzerland, 2000.

KALAMEES, T., **Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia**. Building and Environment, 2007, 42, 2369-2377.

PERSILY, A.K., **Field measurement of ventilation rates**. Indoor Air 2016, 26, 97-111.

SANCHO, T. A. V., Silva, J. C. R., Frederico, C., & de Luna Sales, G. (2021). Potencial de aproveitamento da ventilação natural em unidades de pronto atendimento (UPA) no pós-pandemia. Brazilian Journal of Development, 7(1)

SHAVIV, E., YEZIORO, A., CAPELUTO, I.G., **Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy**. Renewable Energy, 2001, 24, 445-452.

WARGOCKI, P., **Ventilation, thermal comfort, health and productivity.** in Mumovic D, Santamouris M (eds): A Handbook of Sustainable Building Design & Engineering – an integrated approach to energy, health and operational performance. Earthscan, 2009, London, U.K..

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do PRODEC/FEUP – Programa Doutoral em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e a UFT – Universidade Federal do Tocantins**.**

Este trabalho foi financiado por: Financiamento Base - UIDB/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).