

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

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE AIR CHANGE RATE OF A POPULAR HOME IN PALMAS-TO USING THE TRACER GAS METHOD

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA TASA DE RENOVACIÓN DE AIRE DE UNA VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL EN PALMAS-TO UTILIZANDO EL MÉTODO DE GAS TRAZADOR

Murilo Marcolini^{*1}, Ricardo Almeida^{1,2}, Eva Barreira¹

¹Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, CONSTRUCT-LFC, Porto, Portugal.

²Instituto Politécnico de Viseu, Departamento de Engenharia Civil, Viseu, Portugal.

*Correspondência: Avenida 1407 Sul, S/N, Centro, Quadra Av. Ns 15, Condomínio Mirante do Lago, Rua 10, Lt 10, Palmas, Tocantins, Brasil. CEP: 77.019-870. e-mail murilomarcolini@gmail.com.

Artigo recebido em 18/05/2022 aprovado em 15/12/2022 publicado em

RESUMO

A ventilação dos edifícios desempenha duas funções fundamentais: garante entrada de ar fresco e limpo melhorando a qualidade do ar no interior dos edifícios e promove a retirada dos poluentes que estão no seu interior. Nesse contexto conhecer e quantificar a ventilação de um edifício é um passo fundamental para definição da melhor estratégia de utilização e a simulação computacional permite estimar ganhos e perdas de temperatura interna, associados a cada estratégia, auxiliando o usuário e/ou projetista na escolha. A técnica mais comum para medir as taxas de ventilação assenta na utilização de um gás traçador. Assim este trabalho traz como objetivos mensurar as renovações horárias em uma casa de interesse social através do método do gás traçador e da técnica do declive e avaliar o impacto de diferentes estratégias de ventilação para mitigar o desconforto térmico por sobreaquecimento. Para esse fim foram realizados cinco ensaios, os resultados foram utilizados como dados de entrada num modelo de simulação com auxílio do EnergyPlus8.6 e do DesignBuilder5.5.2. O valor médio de renovações horárias obtido nos ensaios foi $1,16 \text{ h}^{-1}$, demonstrando que o aumento da taxa de renovação de ar na residência, principalmente no período noturno, contribui para mitigação do desconforto por sobreaquecimento.

Palavras-chave: Método do gás traçador; técnica do declive; EnergyPlus.

ABSTRACT

The ventilation of buildings performs two fundamental functions: it ensures the entry of fresh and clean air, improving the quality of the air inside the buildings and promoting the removal of pollutants that are inside them. In this context, knowing and quantifying the ventilation of a building is a

fundamental step to define the best use strategy and the computer simulation allows estimating gains and losses of internal temperature, associated with each strategy, helping the user and/or designer in the choice. The most common technique for measuring ventilation rates relies on the use of a tracer gas. Thus, this work aims to measure the hourly renovations in a house of social interest through the tracer gas method and the slope technique and evaluate the impact of different ventilation strategies to mitigate thermal discomfort due to overheating. For this purpose, five tests were performed, the results were used as input data in a simulation model with the help of EnergyPlus8.6 and DesignBuilder5.5.2. The average value of hourly renewals obtained in the tests was 1.16 h^{-1} , demonstrating that the increase in the rate of air renewal in the residence, especially at night, contributes to mitigating the discomfort caused by overheating.

Keywords: tracer gas method; decay technique; EnergyPlus.

RESUMEN

La ventilación de los edificios cumple dos funciones fundamentales: asegura la entrada de aire fresco y limpio, mejorando la calidad del aire en el interior de los edificios y favoreciendo la eliminación de los contaminantes que se encuentran en su interior. En este contexto, conocer y cuantificar la ventilación de un edificio es un paso fundamental para definir la mejor estrategia de uso y la simulación por computadora permite estimar ganancias y pérdidas de temperatura interna, asociadas a cada estrategia, ayudando al usuario y/o diseñador en la elección. . La técnica más común para medir las tasas de ventilación se basa en el uso de un gas trazador. Así, este trabajo tiene como objetivo medir las remodelaciones horarias en una vivienda de interés social a través del método del gas trazador y la técnica de la pendiente y evaluar el impacto de diferentes estrategias de ventilación para mitigar el malestar térmico por sobrecalentamiento. Para ello se realizaron cinco pruebas, los resultados se usaron como datos de entrada en un modelo de simulación con la ayuda de EnergyPlus8.6 y DesignBuilder5.5.2. El valor medio de renovaciones horarias obtenido en las pruebas fue de $1,16 \text{ h}^{-1}$, demostrando que el aumento de la tasa de renovación del aire en la vivienda, especialmente por la noche, contribuye a mitigar las molestias provocadas por el sobrecalentamiento.

Descriptores: Método de gas trazador; técnica de pendiente; EnergíaPlus.

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, reforçam a importância de garantir níveis elevados de qualidade do ambiente interior (WARGOCKI, 2018).

Neste domínio, a ventilação dos edifícios assume um papel inquestionável. 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 a retirada 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 sistema 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 sendo, contudo, necessário procurar um equilíbrio entre as necessidades energéticas de climatização e as condições de conforto térmico interior. No contexto deste artigo, utiliza-se o termo ventilação para descrever todas as trocas de ar entre o interior e o exterior, ou seja, as intencionais, que resultam de um sistema de ventilação natural, mecânico ou misto, e as não-intencionais, que resultam da infiltração de ar não controlada que ocorre pelos elementos da envolvente.

Barbirato (2020) relembrou a importância da ventilação natural e do arejamento dos ambientes interiores na contenção da propagação da gripe espanhola, no início do século XX. Sancho et al. (2021, p. 11031) destacou o papel da ventilação natural como sendo um grande auxílio na redução da 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”.

Correia (1997), num estudo que buscava medidas preventivas de doenças respiratórias, reforçou a necessidade de uma boa renovação do ar dentro dos edifícios. “Dentro dos edifícios, a prevenção do ambiente de risco deve ter em atenção a manutenção da humidade e temperaturas adequadas e sistemas de ventilação e renovação do ar eficazes”. Comprovando que a ventilação interna em edifícios previne a ocorrência de doenças respiratórias, um ponto importante para saúde humana.

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 a retirada das cargas térmicas e consequente arrefecimento dos espaços interiores (SHAVIV et al., 2001).

A ventilação natural resulta de um diferencial de pressão que pode ocorrer por ação dos ventos, pelo efeito chaminé ou por esses dois processos combinados. A ação do vento provoca escoamentos de ar no exterior do edifício, que resultam em campos de pressão variados, que podem forçar a entrada do vento nos edifícios ou provocar um efeito de sucção nas aberturas (BITTENCOURT; CANDIDO, 2008). O efeito chaminé ocorre devido à diferença de densidade do ar, 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 posição da superfície em relação a incidência do vento e dos obstáculos que existem na envolvente e no entorno imediato à edificação, além do tipo de terreno. 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 quando 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 utiliza um gás traçador. No entanto, em condições muito específicas, como em edifícios muito estanques, onde os fluxos de ar ocorrem quase exclusivamente em dutos, métodos baseados na medição da velocidade do ar podem ser uma boa alternativa para estimar as vazões de ventilação (PERSILY, 2016).

O método do gás traçador permite medir a taxa de renovação de ar real de um espaço confinado (considerado como uma zona única) em função das condições meteorológicas específicas do período de medição. O método baseia-se apenas na medição da taxa de diluição da concentração de um gás traçador previamente injetado no ambiente fechado (FRATTOLILLO et al, 2021).

Entre as várias técnicas de medir as taxas de renovação de ar através do método do gás traçador, a técnica de decaimento é a mais simples de implementar e, conseqüentemente, a mais utilizada. A libertação e a mistura do gás ocorrem numa escala de tempo de minutos e é suficiente avaliar a sua concentração ao longo de um período de apenas algumas horas (NAZAROFF, 2021). Na literatura é possível encontrar vários trabalhos de referência sobre a aplicação desta metodologia para avaliar a taxa de renovação de ar de edifícios residenciais (SHERMAN, 1990; LAUSSMANN et al, 2011; CUI et al, 2015; GOUGH et al, 2018; HONG E KIM, 2018; REMION et al, 2019; JANKOVIC et al, 2022). Trata-se, portanto, de uma técnica já aplicada em vários contextos climáticos, conduzindo a resultados fiáveis, desde que sejam cumpridos os requisitos e procedimentos da norma de ensaio.

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 respectiva vazão de ar (ALMEIDA et al., 2020). Este ensaio pode

ser combinado com uma inspeção termográfica do edifício para facilitar a detecção dos locais onde ocorrem 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 (temperatura média de aproximadamente 32 °C no período de seca que vai de abril a setembro e de 25 °C no período chuvoso que vai de outubro a março), 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 controle das necessidades de arrefecimento para garantia das condições de conforto térmico, devendo privilegiar-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 controle e definição da sua estratégia de utilização mais adequada.

A simulação dinâmica do desempenho térmico e energético de edifícios é uma ferramenta de enorme potencial que permite aos técnicos envolvidos num projeto, entre outras coisas, estudar e otimizar estratégias de ventilação de forma expedita. Vários autores têm publicado estudos dentro deste contexto. Pfafferot et al. (2003) avaliaram a eficácia da ventilação noturna para o controle da temperatura interior num edifício de escritórios.

No Brasil, Hollmuller et al. (2005), analisaram o impacto do uso de resfriamento passivo através de ventilação utilizando tubos enterrados e defasador térmico. O estudo foi apoiado em modelos de simulação criados no programa EnergyPlus, simulando-se uma construção multifamiliar em São Paulo e Florianópolis, e concluindo que a ventilação direta com tubos enterrados apresenta um desempenho muito satisfatório.

Recentemente, O'Donovan et al. (2021) compararam o desempenho de várias técnicas passivas de arrefecimento, incluindo estratégias de ventilação, através da simulação de cenários futuros. Seus estudos comprovaram que por meio das combinações de sistemas passivos a necessidade de resfriamento mecânico pode sofrer uma redução de 89% a 91%. Cakyova et al. (2021) apresentaram um estudo baseado em simulação dinâmica com o programa EnergyPlus que compara o impacto de diferentes estratégias de ventilação para a redução da concentração de dióxido de carbono em casas passivas. Suas análises demonstraram que a ventilação noturna é um sistema eficiente que contribui para a prevenção do risco de aquecimento e que eleva o nível de qualidade ambiental interna.

Assim, este trabalho apresenta dois grandes objetivos: i) medir as renovações horárias (RPH) numa casa de interesse social localizada em Palmas-TO, logo, uma moradia instalada em um clima quente, através do método do gás traçador e da técnica do declive. A revisão da literatura permitiu

identificar uma falta de dados experimentais sobre as taxas de renovação de ar de habitações no Brasil, aumentando o interesse deste trabalho para a comunidade técnica e científica; e ii) avaliar o impacto de diferentes estratégias de ventilação para mitigar o desconforto térmico por sobreaquecimento, utilizando como caso de estudo a casa de interesse social e considerando o resultado dos ensaios de ventilação para a definição do cenário base de referência. A possibilidade da diminuição do desconforto térmico com estratégias passivas, como é o caso da ventilação natural, são uma alternativa muito interessante, combinando preocupações de sustentabilidade com um contexto económico associado a recursos limitados.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a determinação da vazão de renovação de ar recorreu-se ao Método do Gás Traçador e à Técnica do Declive. Este procedimento baseia-se 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.

Método do gás traçador – Técnica do declive

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:

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

Em que:

V[m³] - Volume

C(t)[ppm] - Concentração do gás

t[s] - Tempo

G[cm³/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:

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

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):

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

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

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

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

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

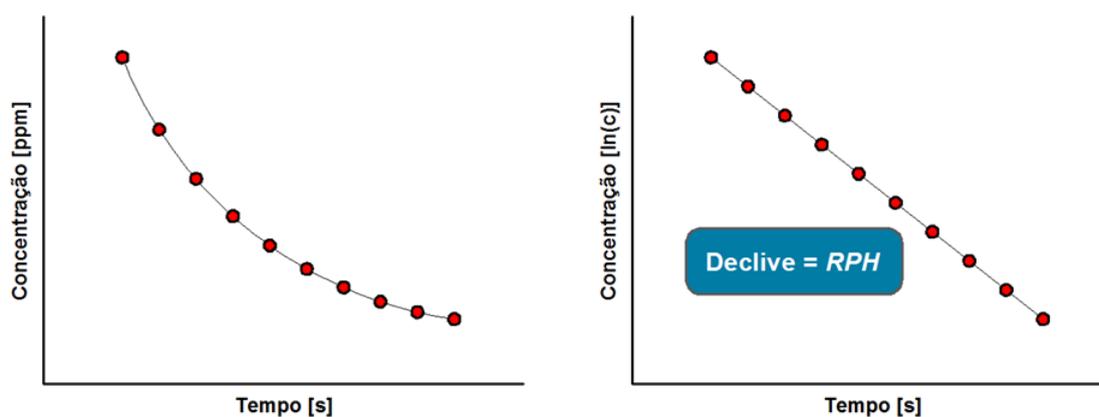
Em que:

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 registrar a evolução da concentração desse gás com o tempo, que em um gráfico $\ln(C)$ versus tempo, pela equação 5, é uma reta (Figura 1B). 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. Fonte: adaptado de AWBI (2003).



Fonte: 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 da 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 em casas de interesse social.

Caso de estudo

O edifício selecionado com caso de estudo foi uma casa de interesse social localizada em Palmas-TO (10° 15' 50" S, 48° 20' 12" W) (Figura 2 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 (CO₂), as medições decorreram com a residência sem qualquer ocupação. O gás traçador (CO₂) foi libertado no local através de um extintor uniformemente em todos os comportamentos, procurando-se sempre obter uma mistura mais homogênea possível. A libertação do gás foi feita por aproximadamente 30 segundos, em cada ponto, junto as três ventoinhas posicionadas no teto, localizados um em cada quarto e outro na sala de estar, com as portas internas abertas potenciando a mistura do ar, seguindo as recomendações indicadas nas normas internacionais que regulam os procedimentos aplicáveis neste tipo de ensaio. A Figura 2 (B) evidencia um croqui com o que foi descrito. Durante todos os ensaios, as janelas externas permaneceram fechadas.

O equipamento para a medição da concentração de CO₂ (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 2 (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 giro, com veneziana de aço (Figura 3).

A metodologia adotada 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 registrada a temperatura e a umidade relativa do ar. A temperatura média em todos os ensaios foi de 28,43 °C, enquanto a umidade relativa média foi de 74,63%. A Tabela 1 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.



Tabela 1. Níveis de temperatura e umidade conforme horário e ensaio realizado.

Ensaio	Horário	Méd. Temperatura (°C)	Méd. Umidade Relativa (%)
1	8h 14	28,52	73,73
2	9h 17	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

Equipamentos utilizados

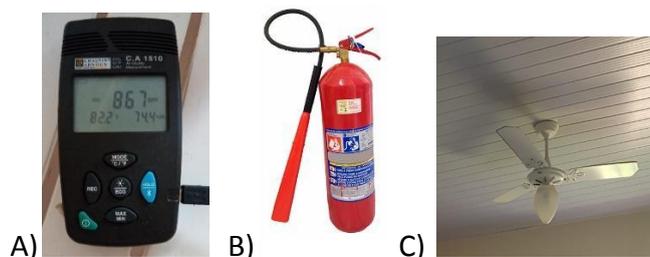
Para este estudo foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Medidor da concentração de dióxido de carbono, temperatura e umidade relativa / Data Logger – Modelo Chauvin Arnoux CA 1510. Este equipamento se encontrava calibrado por empresa certificadora europeia e foi usado para monitoramento da concentração de CO₂, da temperatura e da umidade relativa do ar (Figura 4 A). O equipamento apresenta as seguintes precisões: ± 50 ppm ou ± 3

% do valor medido, ± 0.5 °C e ± 2 %, respectivamente para a medição da concentração de CO₂, da temperatura e da umidade relativa do ar. As resoluções são as seguintes: 1 ppm, 0,1 °C e 0,1%.

- Extintor de CO₂ – utilizou-se um equipamento portátil para libertar dióxido de carbono (Figura 4 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 homogênea do ar (Figura 4 C).

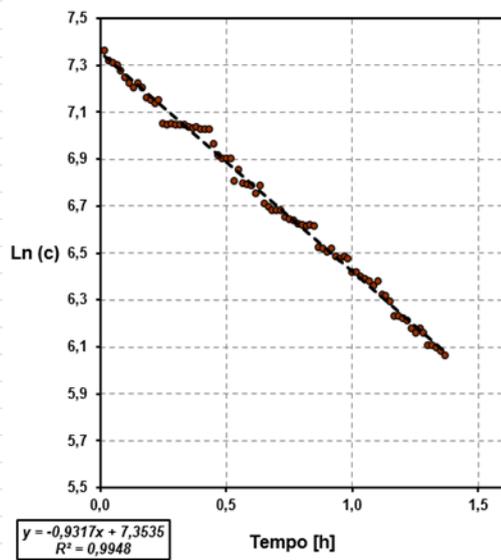
Figura 4. Equipamentos utilizados: (A) Sensor / Data-logger (concentração de CO₂, temperatura e umidade relativa); (B) Extintor de CO₂; (C) Ventilador de teto./



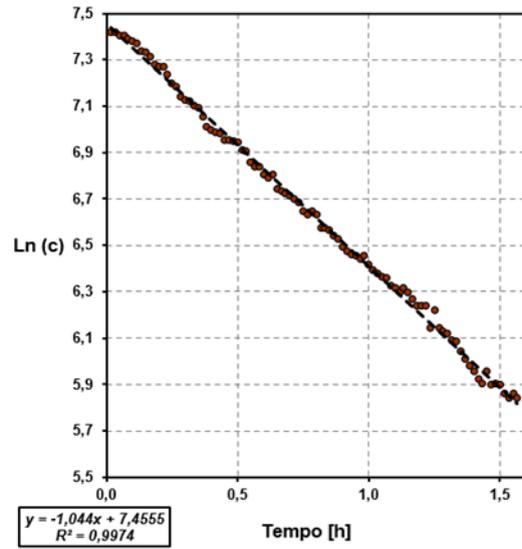
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os ensaios tiveram uma duração superior a uma hora. A Figura 5 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 a 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 m³.

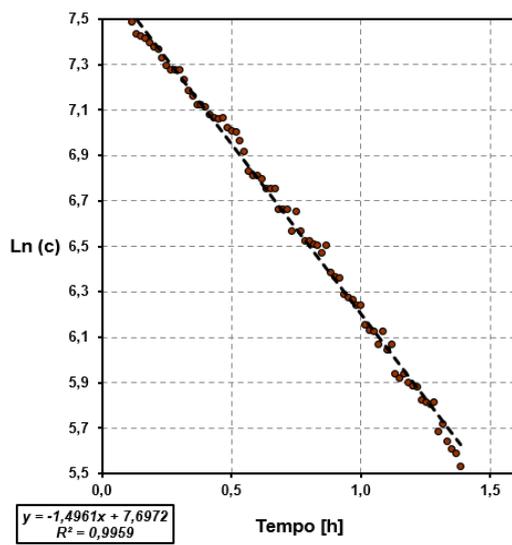
Figura 5. Variação do logaritmo da concentração de dióxido de carbono ao longo do período de ensaio: (A) ensaio 1; (B) ensaio 2; (C) ensaio 3; (D) ensaio 4; e (E) ensaio 5.



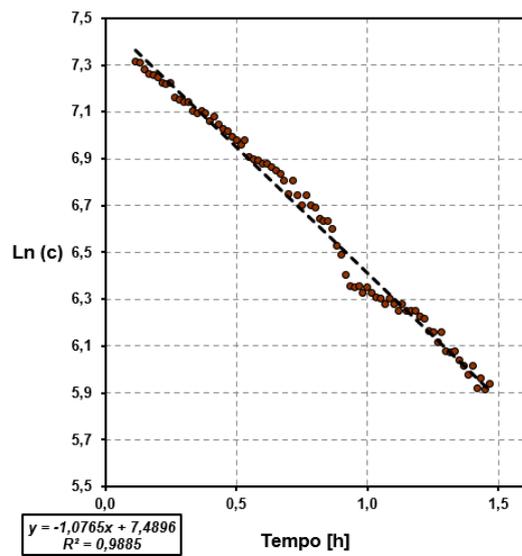
A



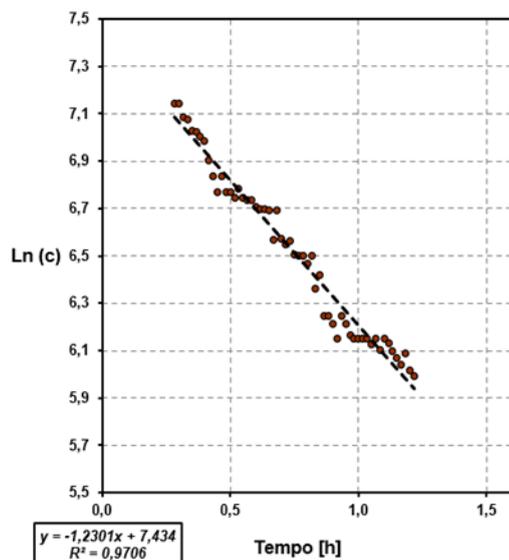
B



C



D



E

A Tabela 2 mostra os resultados obtidos nos cinco ensaios, incluindo a renovação horária e o respectivo vazão de ventilação. Apresenta-se ainda o valor da média, desvio padrão e coeficiente de variação das duas grandezas.

Tabela 2. Resultados do RPH de todos os ensaios realizados.

	RPH (h⁻¹)	Vazão (m³/h)
Ensaio 1	0,93	103,50
Ensaio 2	1,04	115,80
Ensaio 3	1,50	167,00
Ensaio 4	1,08	120,20
Ensaio 5	1,23	136,90
Média	1,16	128,70
Desvio Padrão	0,22	24,50
Coef. de variação	19%	

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 dispõe de nenhum dispositivo específico de ventilação (quer para a admissão, quer para a extração de ar). Este valor será considerado posteriormente para atuar nas simulações como sendo a taxa de renovação de ar. Embora num clima quente como o de Palmas-TO, uma taxa de renovação de ar elevada possa até ser benéfica, especialmente se ocorrer durante a noite, o mesmo não acontece no caso da utilização de um sistema de climatização. Nesse caso, poderá ocorrer uma perda de eficiência dos sistemas de climatização que venham a ser instalados, por ação da infiltração de ar não controlada.

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 aspectos 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.

Estratégias de ventilação para a mitigação do sobreaquecimento

Em climas quentes, a ventilação pode ser um instrumento eficaz para a mitigação do desconforto térmico devido ao sobreaquecimento. No entanto, para tal, é necessário que a estratégia de ventilação seja a correta, tirando partido dos períodos em as condições exteriores são especialmente favoráveis. Nesse sentido, foi criado um modelo de simulação da casa de interesse social descrita e caracterizada nas secções. O modelo foi criado no programa DesignBuilder, que utiliza o algoritmo do EnergyPlus para realizar as simulações.

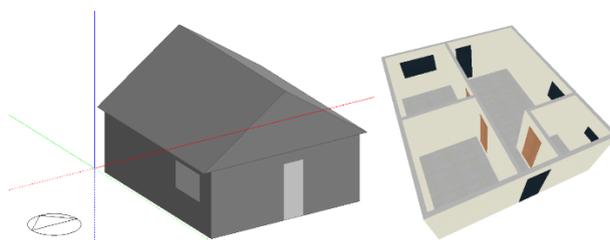
A metodologia adotada inclui quatro simulações, correspondentes a diferentes estratégias de ventilação: S1.16, S2.0, S3.0 e S3.0N. Na simulação S1.16 foi considerada uma taxa de ventilação de $1,16 \text{ h}^{-1}$, correspondente ao valor obtido nos ensaios realizados no local. Contudo, é importante frisar que os resultados obtidos são decorrentes de uma média e não correspondem plenamente à realidade cotidiana da habitação. Efetivamente, em contexto de simulação térmica e energética é habitual considerar-se um valor médio constante para a taxa de renovação de ar, embora não correspondendo ao desempenho real dos edifícios em que este valor varia no tempo, especialmente devido à ação do vento. Efetivamente, em determinadas condições exteriores a taxa de renovação de ar pode ser ainda mais elevada do que a que foi considerada nas simulações. Esta simulação será o cenário base de referência. As simulações S2.0 e S3.0 mantêm a estratégia de ventilação constante e permanente, havendo apenas um aumento da taxa de ventilação para $2,0 \text{ h}^{-1}$ e $3,0 \text{ h}^{-1}$, respetivamente. Na simulação S3.0N a estratégia é alterada, passando a um regime variável, em que durante o dia a taxa de ventilação mantém-se no valor medido ($1,16 \text{ h}^{-1}$) e durante a noite aumenta para $3,0 \text{ h}^{-1}$, tentando beneficiar das condições exteriores mais favoráveis durante este período.

Os resultados das simulações foram analisados numa perspectiva de avaliação do conforto térmico interior, utilizando-se para tal o modelo adaptativo proposto na norma EN 16798-2 (CEN, 2019), assumindo-se os critérios relativos à categoria 2, que é a mais adequada para a avaliação de edifícios existentes e para definir estratégias de reabilitação. Este modelo define um intervalo de

conforto para a temperatura operativa interior, definido em função da temperatura exterior exponencialmente ponderada dos últimos sete dias.

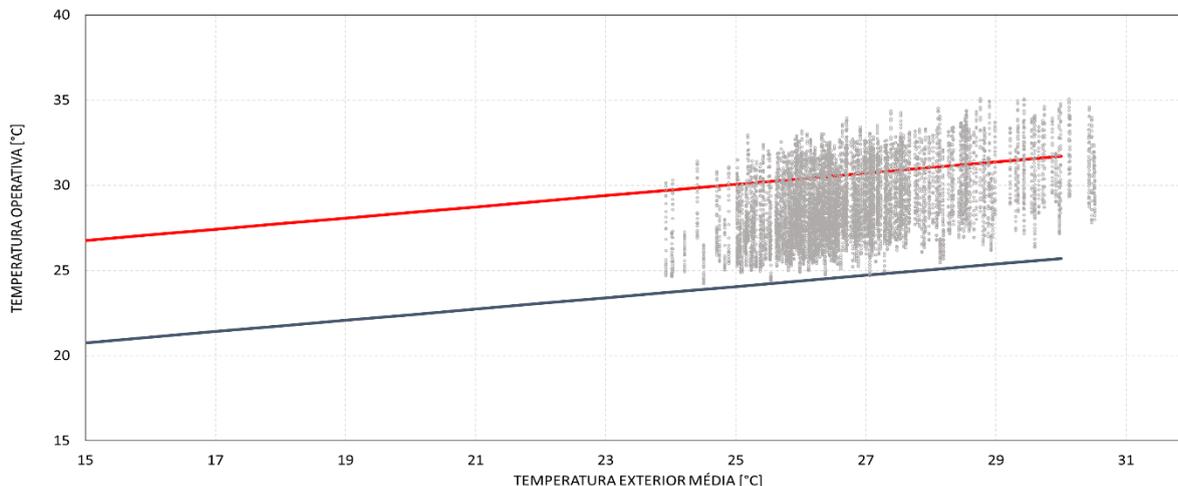
A Figura 6 mostra o modelo desenvolvido no DesignBuilder. As paredes exteriores são em bloco cerâmico de 9 cm, com reboco de 2 cm em ambas as faces ($U = 3,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$). O pavimento é em concreto com revestimento cerâmico. Os ganhos internos foram agrupados num único valor constante ($4,0 \text{ W}/\text{m}^2$), seguindo-se as recomendações das normas internacionais para a simulação térmica e energética de edifícios residenciais.

Figura 6. Modelo desenvolvido no DesignBuilder em 3D.



A Figura 7 mostra a aplicação do modelo de conforto aos resultados da simulação horária da temperatura operativa no cenário de referência (S1.16). Observa-se desde logo que o clima de Palmas-TO apresenta pequenas variações anuais, sendo caracterizado por temperaturas elevadas ao longo de todo o ano. A temperatura exterior exponencialmente ponderada dos últimos sete dias varia entre os $24,0 \text{ }^\circ\text{C}$ e os $30,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Este aspecto tem um reflexo óbvio na temperatura interior, com períodos significativos de desconforto por sobreaquecimento.

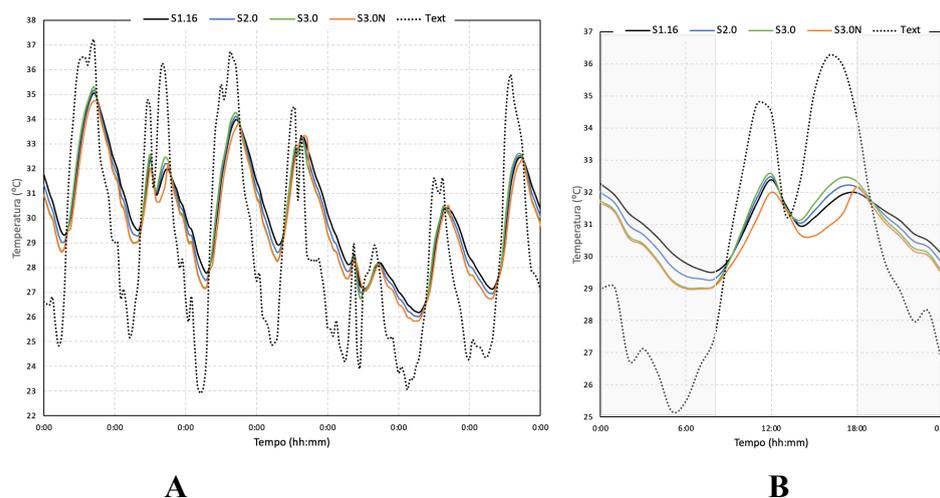
Figura 7. Aplicação do modelo de conforto aos resultados da simulação S1.16.



Para melhor perceber o impacto das estratégias de ventilação, a Figura 8A mostra a variação da temperatura na habitação ao longo de uma semana para os quatro cenários de simulação, juntamente com a temperatura exterior. Os resultados mostram que a temperatura no interior da casa é bastante elevada, independentemente da estratégia de ventilação, devido à também elevada temperatura exterior.

A Figura 8B mostra um detalhe de um dos dias simulados. O dia selecionado caracteriza-se por temperaturas especialmente elevadas durante o dia, permitindo assim perceber que nestas circunstâncias a entrada de ar é prejudicial. O impacto positivo da ventilação noturna é também observável. A região sombreada do gráfico corresponde ao período em que a taxa de ventilação foi aumentada. A semana selecionada é especialmente quente, para se evidenciar os fenómenos.

Figura 8. Variação da temperatura: (A) durante 1 semana; (B) durante 24 horas.



Para facilitar a interpretação dos resultados, foram calculados dois indicadores de desempenho: I_1 , que corresponde à taxa de desconforto, ou seja, a percentagem de tempo em que o edifício se encontra fora da zona de conforto (Equação 6); I_2 , que corresponde à somatória das distâncias entre os pontos em desconforto e o respetivo limite de conforto dividida pelo número de ocorrências, ou seja, avalia a severidade do desconforto (Equação 7).

$$I_1 = \frac{\sum Nd}{Nt} \times 100 \quad \text{Eq. 6}$$

Em que:

Nd - Número de vezes que ocorreram desconforto

Nt - Número total analisado

$$I_2 = \frac{\sum(Td-Lc)}{Nd} \quad \text{Eq. 7}$$

Em que:

Lc [°C] - Temperaturas da faixa de limite de conforto

Td [°C] - Temperaturas em desconforto

Nd - Número de vezes que ocorreram desconforto

A Tabela 3 sintetiza o valor dos dois indicadores obtidos para os quatro cenários simulados. Os resultados confirmam que o sobreaquecimento é um problema importante, resultando em cerca de 23% do tempo em desconforto no cenário atual (S1.16). A estratégia de ventilação pode efetivamente contribuir para uma melhoria da situação, sendo que o melhor resultado corresponde ao cenário com ventilação noturna. Efetivamente, o clima de Palmas é muito quente, resultando em longos períodos em que a entrada de ar do exterior prejudica as condições de conforto térmico interior e, portanto, a melhor solução de ventilação terá de assentar numa estratégia inteligente, que tire partido apenas dos períodos em que o gradiente de temperatura entre o interior e o exterior é favorável. Este aspeto é evidente nos resultados do indicador I_2 , que, nos cenários de ventilação constante e permanente, aumenta com o aumento da taxa de ventilação, confirmando que durante largos períodos do dia a entrada de ar do exterior é contraproducente.

Tabela 3. Valor do indicador I_{des} nos quatro cenários simulados.

Cenários	I_1 [%]	I_2 [°C]
S1.16	22,90	1,11
S2.0	20,80	1,13
S3.0	19,20	1,16
S3.0N	19,00	1,10

CONCLUSÃO

A ventilação é um parâmetro fundamental para o desempenho dos edifícios, desde logo com impacto direto na saúde dos utilizadores, mas também no nível de conforto térmico das habitações, no seu desempenho energético e, também, na própria durabilidade das construções. Assim, 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. Nesse sentido, a medição da taxa de ventilação através do

método do gás traçador é um procedimento comum e devidamente caracterizado em normas internacionais, com resultados validados, e cuja implementação é relativamente simples. Este trabalho teve por objetivo principal medir as renovações horárias numa casa de interesse social 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 de interesse social, embora, tendo em conta a variabilidade encontrada, 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, que não permanecem constantes ao longo dos ensaios (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 ($1,16 \text{ h}^{-1}$), tendo em conta que se trata de infiltração de ar, apontando para uma eventual perda de eficiência dos sistemas de climatização que venham a ser instalados.

O segundo objetivo do trabalho foi avaliar o impacto de diferentes estratégias de ventilação na mitigação do desconforto térmico por sobreaquecimento, avaliado a partir do modelo na norma EN 16798-2, utilizando como caso de estudo a casa de interesse social e considerando o resultado dos ensaios de ventilação para a definição do cenário base de referência. A partir dos resultados obtidos nas simulações é possível concluir o seguinte:

- a temperatura no interior da casa é genericamente elevada, incompatível com as condições estabelecidas para o conforto térmico, resultado de uma alta temperatura exterior. No cenário base de referência o período de desconforto por sobreaquecimento corresponde a cerca de 23%. Este valor pode ser reduzido para 19%, se for aplicada uma estratégia de ventilação intermitente, com taxas mais elevadas no período noturno;
- nos dias em que a temperatura exterior é especialmente elevada, observam-se vários períodos em que a entrada de ar é prejudicial para o conforto térmico. Assim, o incremento da taxa de renovação de ar pode ser útil para minimizar o desconforto, mas, para se otimizar o seu desempenho, requer uma otimização em que apenas se tira partido dos períodos do dia em que o seu efeito é benéfico, isso levando-se em consideração as condições meteorológicas de momento.

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).

Todos os autores declararam não haver qualquer potencial conflito de interesses referente a este artigo.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R.M.S.F., BARREIRA, E., MOREIRA, P., A discussion regarding the measurement of ventilation rates using tracer gas and decay technique, *Infrastructures*, v. 5(10), p. 85, 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM 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.
- 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*, v. 140, p. 224-235, 2017.
- CAKYOVA, K., FIGUEIREDO, A., OLIVEIRA, R., REBELO, F., VICENTE, R., FOKAIDES, P., Simulation of passive ventilation strategies towards indoor CO₂ concentration reduction for passive houses. *Journal of Building Engineering*, v. 43, 103108, 2021.
- 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*, v. 10(3), p. 55, 2020.
- CUI, S., COHEN, M., STABAT, P., MARCHIO, D.. CO₂ tracer gas concentration decay method for measuring air change rate. *Building and Environment*, v. 84, p. 162-169, 2015.
- ETHERIDGE, D.W. AND SANDBERG, M. *Building Ventilation—Theory and Measurement*. John Wiley & Sons, Chichester. 1996.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – CEN EN 16798-2:2019 – Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 2: Interpretation of the requirements in EN 16798-1 - Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics (Module M1-6). CEN, Brussels, Belgica.
- FRATTOLILLO, A., STABILE, L., DELL'ISOLA, M. Natural ventilation measurements in a multi-room dwelling: Critical aspects and comparability of pressurization and tracer gas decay tests. *Journal of Building Engineering*, v. 42, 102478, 2021.
- 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.
- GOUGH, H. L., LUO, Z. HALIOS, C.H., KING, M.F., NOAKES, C.J., GRIMMOND, C.S.B., BARLOW, J.F., HOXEY, R., QUINN, A.D., Field measurement of natural ventilation rate in an idealised full-scale building located in a staggered urban array: Comparison between tracer gas and pressure-based methods. *Building and Environment*. Volume 137. 2018. p. 246-256. ISSN 0360-1323,

HOLLMULLER, P., LAMBERTS, R., WESTPHAL, F. S., ORDENES, M. M., CARLO, J.C. (2015). Potencial da ventilação inercial para resfriamento passivo em climas brasileiros. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, ENCAC 2005, p. 1-11.

HONG, G.; KIM, D. D., Airtightness of electrical, mechanical and architectural components in South Korean apartment buildings using the fan pressurization and tracer gas method. *Building and Environment*. Volume 132. 2018. p. 21-29. ISSN 0360-1323.

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

JANKOVIC, A., GENNARO, G., CHAUDHARY, G., GOIA, F., FAVOINO, F., Tracer gas techniques for airflow characterization in double skin facades. *Building and Environment*. Volume 212. 2022. ISSN 0360-1323.

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

LAUSSMANN, D., HELM, D.. Air Change Measurements Using Tracer Gases: Methods and Results. Significance of air change for indoor air quality. Book Chapter from: Mazzeo, N.. Chemistry, Emission Control, Radioactive Pollution and Indoor Air Quality. IntechOpen, London. 10.5772/18600. DOI: 10.5772/18600.

NAZAROFF, W.W.. Residential air-change rates: A critical review. *Indoor Air*, v. 31 (2), p. 282-313, 2021.

O'DONOVAN, A., MURPHY, M. D., O'SULLIVAN, P. D.. Passive control strategies for cooling a non-residential nearly zero energy office: Simulated comfort resilience now and in the future. *Energy & Buildings*, v. 231 110607, p. 1-20, 2021.

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

PFAFFEROT, J., HERKEL, S., JASCHKE, M.. Design of passive cooling by night ventilation: evaluation of a parametric model and building simulation with measurements. *Energy and Buildings*, v. 35, p. 1129-1143, 2003.

PINTO, A., SILVA, F., MAMEDE, M. Avaliação experimental do comportamento térmico de edifícios Aplicação a um edifício Gaioleiro. cidades e desenvolvimento. LNEC, Lisboa, 2012.

REMION, G., MOUJALLED, B., MANKIBI, M., Review of tracer gas-based methods for the characterization of natural ventilation performance: Comparative analysis of their accuracy. *Building and Environment*. Volume 160. 2019. ISSN 0360-1323.

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

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

SHERMAN, M.H.. Tracer-Gas Techniques for Measuring Ventilation in a Single Zone. *Building and Environment*, v. 25, n. 4, pp. 365--374, 1990.

WARGOCKI, P., Ventilation, thermal comfort, health and productivity. *Journal A Handbook of Sustainable Building Design and Engineering*, 2018.