XVIII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
XIV ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
AMBIENTE CONSTRUÍDO E USUÁRIO: PERSPECTIVAS LATINO-AMERICANAS

Taxas de infiltração de ar em edifícios multifamiliares: levantamento experimental e simulação computacional

Tasas de infiltración de aire en edificios multifamiliares: levantamiento experimental y simulación computacional

Air infiltration rates in multi-family buildings: experimental survey and computational simulation

Desempenho térmico do ambiente construído / *Desempeño térmico del ambiente construido* / *Thermal performance of the built environment*

Balanza, Nicole Alejandra Zambrana
Mestranda, Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, nicole.zambrana@usp.br

Chvatal, Karin Maria Soares
Doutora, Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, karin@sc.usp.br

Resumo

A pesquisa em andamento visa caracterizar a taxa de infiltração de ar em um determinado conjunto de residências multifamiliares brasileiras urbanas. A taxa de infiltração, que corresponde à renovação de ar pela envolvente da edificação quando todas as janelas e portas estão fechadas, é um aspecto fundamental para o desempenho térmico das habitações, especialmente em cenários de mudança climática. A metodologia consiste em coleta de dados experimentais e simulação computacional. O método do gás traçador será utilizado para a obtenção da taxa de infiltração de ar em uma determinada amostra de edificações. Em seguida, essa taxa de infiltração será simulada no programa CONTAM, para essas mesmas habitações, de modo que o modelo numérico seja validado com dados experimentais, por meio de ajustes nos dados de entrada. Dessa forma, visa-se obter resultados mais precisos e abrangentes relativos às taxas de infiltração de ar em edificações brasileiras e à sua modelagem em programas computacionais.

Palavras-chave: Infiltração de ar. Habitações multifamiliares. Gás traçador. Simulação computacional.

Resumen

La investigación en curso tiene como objetivo caracterizar la tasa de infiltración de aire en un conjunto específico de residencias multifamiliares urbanas en Brasil. La tasa de infiltración, que corresponde a la renovación de aire a través de la envolvente del edificio cuando todas las ventanas y puertas están cerradas, es un aspecto fundamental para el rendimiento térmico de las viviendas, especialmente en escenarios de cambio climático. La metodología incluye la colecta de datos experimentales y simulaciones computacionales. Se utilizará el método del gas trazador para obtener la tasa de infiltración de aire en una muestra determinada de edificaciones. Posteriormente, esta tasa de infiltración será simulada en el programa CONTAM para las mismas viviendas, de manera que el modelo numérico sea validado con datos experimentales mediante ajustes en los datos de entrada. Así, se busca obtener resultados más precisos y amplios sobre las tasas de infiltración de aire en edificaciones brasileñas y su modelación en programas computacionales.

Palabras clave: Infiltración de aire. Vivienda multifamiliares. Gas trazador. Simulación computacional.

Abstract

The ongoing research aims to characterize the air infiltration rate in a specific set of urban multifamily residences in Brazil. The infiltration rate, which corresponds to the renewal of air through the building's envelope when all windows and doors are closed, is a fundamental aspect of the thermal performance of housing, especially in the context of climate change. The methodology involves the collection of experimental data and computational simulation. The tracer gas method will be used to determine the air infiltration rate in a selected sample of buildings. Subsequently, this infiltration rate will be simulated in the CONTAM program for the same residences, allowing the numerical model to be validated with experimental data through adjustments to the input data. This approach aims to achieve more accurate and comprehensive results regarding air infiltration rates in Brazilian buildings and their modeling in computational programs.

Keywords: Air infiltration. Multifamily housing. Tracer gas. Computational simulation.

Introdução

Considerando que a produção de energia elétrica é uma das principais fontes de emissões de gases de efeito estufa (IPCC, 2021), as edificações desempenham um papel essencial para a redução do impacto do efeito estufa, especialmente na fase de uso, que corresponde a 80 a 90% da energia de todo o seu ciclo de vida (Hu, 2019). Desta forma, o desempenho energético assume um papel central no contexto de mudanças climáticas, em razão disso as simulações computacionais representam uma ferramenta valiosa para a avaliação do comportamento termo energético de edificações.

Um dos aspectos que influencia o desempenho das edificações, sendo fonte de incertezas nas simulações, é a taxa de infiltração. Esse fenômeno refere-se à entrada não intencional de ar externo em um edifício por meio de fissuras, rachaduras ou outras aberturas não planejadas na envoltória do edifício, como paredes, janelas e portas (ASHRAE, 2021). A taxa de infiltração, além de ser calculada por meio de modelos de rede (Walton, 1989), pode também ser analisada pelo método do gás traçador, amplamente utilizado em ambientes construídos, sobretudo em edificações que não dispõem de sistemas de ventilação mecânica (Remion *et al*., 2019).

Há uma vasta literatura referente à caracterização da infiltração da taxa de ar de edificações em vários países utilizando o método do gás traçador (Chan; Joh; Sherman, 2013; Hong; Kim, 2016; Cheng; Li, 2018; Wang *et al*., 2024). No entanto, no contexto brasileiro, há apenas um trabalho publicado sobre edificações multifamiliares e dois sobre unidades térreas de Habitação de Interesse Social (HIS), realizados respectivamente por Rodrigues *et al*. (2020), Marcolini; Barreira; Almeida (2021) e Decker, Araújo e Atem (2023). A pesquisa de Rodrigues *et al*. (2020) foi realizada de forma experimental em três edifícios multifamiliares residenciais na cidade de São Paulo, enquanto Marcolini; Barreira; Almeida (2021) conduziram seus experimentos em uma HIS na cidade de Palmas e Decker; Araújo; Atem, (2023) avaliaram um protótipo de HIS, localizado na cidade de Londrina. Contudo, a considerável variação dos dados apresentados nesses estudos destaca a necessidade de mais pesquisas que possibilitem uma caracterização mais abrangente sobre a taxa de infiltração de ar no contexto brasileiro.

Dessa forma, esta pesquisa tem como objetivo caracterizar a taxa de infiltração de ar em habitações multifamiliares, concentrando-se em estúdios e apartamentos de até dois dormitórios, localizados em bairros ao redor do campus 1 da USP de São Carlos, SP.

Metodologia

Para esta pesquisa, será implementado o método de decaimento de concentração de gás traçador para medir a taxa de infiltração de ar em unidades habitacionais multifamiliares, complementada por simulações computacionais no software CONTAM (Dols e Polidoro, 2015) para validação de dados. O procedimento está estruturado em cinco etapas:

(1) Definição das amostras de habitações para medição e simulação: em primeira instância foi elaborada uma lista das características das edificações que influenciam a taxa de infiltração (Tabela 1), com base em estudos de diversos países (Chan; Joh; Sherman, 2013; Shi; Chen; Zhao (2015); Remion *et al* (2019); Wang *et al.*, 2024). Este levantamento foi realizado para definir o recorte de habitações multifamiliares a serem estudadas, dentro da região de estudo, que compreende uma série de edifícios multifamiliares de estúdios até 2 dormitórios. Assim, procurando obter uma amostra representativa que consiga contemplar a variação de ao menos um dos parâmetros de influência. Pretende-se realizar a medição de aproximadamente 20 unidades habitacionais, em linha com estudos anteriores, como os de Shi; Chen (2015) e Wang *et al.* (2024). A amostra será definida com base em métodos estatísticos de amostragem, semelhante ao procedimento adotado por Wang *et al.* (2024).

Tabela 1: características que influenciam na taxa de infiltração

Estudo	Ano de construção	Pavimento	Volume da UH	Área da UH	Entorno
Chan; Joh; Sherman, 2013	X	X	X	—	X
Shi; Chen; Zhao (2015)	X	X	—	X	X
Remion *et al* (2019)	X	—	—	—	X
Wang *et al* (2024)	X	X	—	X	X

Fonte: autora, 2025

(2) Pré-teste: é uma fase preliminar que antecede a aplicação formal do método decaimento com o gás traçador, e que é o momento atual no qual a pesquisa se encontra. O principal objetivo do pré-teste é identificar possíveis falhas, ambiguidades ou inadequações do experimento em si. Por meio deste procedimento será possível realizar ajustes necessários para garantir maior clareza, objetividade e precisão nas informações obtidas. Dessa forma, contribuindo para a qualidade e confiabilidade dos resultados finais, reduzindo vieses e potenciais erros metodológicos.

(3) Aplicação formal do método do gás traçador: o método de decaimento de concentração de gás traçador para medir a taxa de infiltração de ar foi escolhido considerando-se a sua eficácia e melhor custo-benefício (Remion *et al.*, 2019). O procedimento será conduzido em conformidade com as recomendações da norma ASTM E741-11 (2017), que estabelece diretrizes para a avaliação de fluxos de ar em ambientes fechados. Durante os ensaios, serão coletadas variáveis ambientais internas, bem como condições externas, a fim de caracterizar as condições de fronteira que influenciam os resultados, permitindo que esses dados sejam utilizados na validação numérica, contribuindo assim para um entendimento mais preciso das dinâmicas de fluxo em diferentes contextos.

(4) Simulações computacionais: serão realizadas com o programa CONTAM, este programa utiliza modelos de rede para o cálculo do fluxo de ar em múltiplas zonas interconectadas, dentro de um edifício (Dols e Polidoro, 2015). Baseia-se em um modelo que calcula a taxa de renovação do ar para cada zona térmica, devido à ação dos ventos. Essa taxa de renovação é dada em "renovações de ar por hora" (*air changes per hour*, ou ACH), que corresponde ao volume de ar renovado no ambiente, durante uma hora, dividido pelo volume ocupado pelo ar nesse mesmo ambiente. Uma vez que as simulações serão feitas considerando as janelas e portas externas fechadas, o valor obtido de ACH corresponde à taxa de infiltração de ar.

(5) Análise de resultados: serão analisados os valores de taxa de infiltração obtidos, comparando os dados experimentais com as simulações, permitindo identificar padrões e influências dos parâmetros construtivos, além de obter um valor representativo da taxa de infiltração aplicável para o contexto analisado.

Resultados

Os resultados parciais incluem a definição das edificações selecionadas para o pré-teste, compreendendo um total de quatro unidades habitacionais em edifícios multifamiliares. Para isto, foram desenvolvidas uma ''ficha levantamento'', um roteiro e bitácora de experimento. O pré-teste foi dividido em três etapas principais: (1) pré-medição, sendo a caracterização e levantamento dos apartamentos; (2) medição, aplicação do procedimento; e (3) pós-medição, destinada à coleta, organização e análise dos dados. Adicionalmente, foi realizado o aprendizado prático do manuseio dos equipamentos de medição, incluindo o sensor de CO_2 e o cilindro de gás traçador. Por fim, foi elaborado um questionário estruturado para envio aos usuários, com o intuito de mapear apartamentos disponíveis para medição ao longo do ano de 2025.

Conclusão

A pesquisa ainda não possui resultados conclusivos, encontrando-se na fase de pré-teste do método experimental. No entanto, considera-se que a validação das simulações computacionais com dados experimentais será útil para aprimorar a modelagem de habitações similares, em programas que usam modelos de rede. A base de dados de infiltração criada a partir dos dados medidos em diversos apartamentos agregará aos dados já existentes medidos em edificações no Brasil e contribuirá para um melhor entendimento dos valores desse parâmetro no contexto estudado.

Referências

ASHRAE. **Handbook of Fundamentals.** Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM E741-11 (2017) - Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution.** West Conshohocken: ASTM International, 2017.

DOLS, W. S.; POLIDORO, B. J. **CONTAM User Guide and Program Documentation Version 3.2.** Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2015. (NIST Technical Note 1887). DOI: 10.6028/NIST.TN.1887.

CHAN, W. R.; JOH, J.; SHERMAN, M. H. Analysis of air leakage measurements of US houses. **Energy and Buildings**, v. 66, p. 616–625, nov. 2013.

CHENG, P. L.; LI, X. Air infiltration rates in the bedrooms of 202 residences and estimated parametric infiltration rate distribution in Guangzhou, China. **Energy and Buildings**, v. 164, n. 1872-6178, p. 219–225, abr. 2018.

DECKER, Pedro Henrique Bruder; ARAÚJO, Giovanna Domingos; ATEM, Camila Gregório. Medição da taxa de ventilação em uma HIS utilizando o método de gás traçador. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENCAC), 17.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ELACAC), 13., 2023, São Paulo. **Anais [...].** São Paulo: [s.n.], 2023.

HONG, G.; KIM, B. S. Field measurements of infiltration rate in high rise residential buildings using the constant concentration method. **Building and Environment**, v. 97, n. 0360-1323, p. 48–54, fev. 2016.

HU, Ming. Building impact assessment—A combined life cycle assessment and multi-criteria decision analysis framework. **Resources, Conservation and Recycling,** v. 150, p. 104410, 2019. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104410.

IPCC, 2021: **Climate change 2021: the physical science basis.** Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. P.éan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

MARCOLINI, Murilo; BARREIRA, Eva; ALMEIDA, Ricardo. Avaliação experimental da taxa de renovação de ar de uma casa popular em Palmas-TO utilizando o método do gás traçador. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2021. **Anais [...].** *[S. l.]*, 2021. p. 725–733. Disponível em: https://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/4456.

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**, v. 160, 2019, 106180, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106180.

RODRIGUES, L. *et al*. Quantifying airtightness in Brazilian residential buildings with focus on its contribution to thermal comfort. **Building Research & Information**, p. 1–22, 3 out. 2020.

SHI, S.; CHEN, C.; ZHAO, B. Air infiltration rate distributions of residences in Beijing. **Building and Environment**, v. 92, n. 0360-1323, p. 528–537, out. 2015.

WALTON, G. AIRNET -**A Computer Program for Building Airflow Network Modeling**, 1984. Disponível em: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir89-4072.pdf>. Acesso em: 23 março. 2024.

WANG, Y. *et al*. Air infiltration rate distribution across Chinese five climate zones: A modelling study for rural residences. **Building and Environment**, v. 252, n. 111284, p. 111284, 15 mar. 2024.

Agradecimentos

Ao apoio institucional proporcionado pelo Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (IAU/USP e ao apoio financeiro oferecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). Esta pesquisa está vinculada aos Processos FAPESP **2023/02387**-1 e **2024/08387-6**.