MEDIÇÃO DA TAXA DE VENTILAÇÃO EM UMA HIS UTILIZANDO O MÉTODO DE GÁS TRAÇADOR

Pedro Henrique Bruder Decker (1); Giovanna Domingos Araújo (2); Camila Gregório Atem (3)
(1) Mestre, engenheiro civil, pedroh.b.decker2@uel.br, Universidade Estadual de Londrina, Rodovia Celso Garcia Cid, PR-445, Km 380 - Campus Universitário, Londrina - PR, 86057-970, (43)3371-4649
(2) Graduanda, engenheira civil, giovanna.domingos@uel.br, Universidade Estadual de Londrina, Rodovia Celso Garcia Cid, PR-445, Km 380 - Campus Universitário, Londrina - PR, 86057-970, (43)3371-4649
(3) Doutora, arquiteta, camila.atem@uel.br, Universidade Estadual de Londrina, Rodovia Celso Garcia Cid, PR-445, Km 380 - Campus Universitário, Londrina - PR, 86057-970, (43)3371-4649

RESUMO

O Brasil, país tropical, possui clima majoritariamente quente e úmido. Assim, umas das estratégias possíveis para promover a qualidade de vida da população e o seu conforto dentro das edificações, sem contribuir negativamente para o meio ambiente, é a ventilação natural. Essa estratégia bioclimática também dificulta a disseminação de doenças infectocontagiosas, como por exemplo a Covid-19, promovendo a salubridade dos ambientes. No entanto, muitas vezes esse fator não é considerado pelos projetistas durante a fase de concepção de uma edificação, principalmente as Habitações de Interesse Social (HIS), uma vez que há grande dificuldade em prever como o vento incidirá sobre o edifício e verificar se haverá uma boa ventilação. Este trabalho teve como objetivo estimar as taxas de ventilação natural de um modelo de HIS. Para tanto foi utilizado o método de gases traçadores na habitação localizada na cidade de Londrina -PR. O gás utilizado foi o CO_2 advindo de um cilindro. A coleta de dados foi realizada por medidores NDIR e os dados tratados através de dois métodos de cálculo: multipontos e 2 pontos. Três diferentes cenários de ventilação foram analisados e os resultados demonstraram variações significativas nas taxas de ventilação. O estudo concluiu que a unidade habitacional atende aos critérios normativos brasileiros em relação à área mínima de abertura para ventilação e enfatiza a importância de considerar a ventilação natural no projeto de edificações.

Palavras-chave: ventilação natural, gás traçador, HIS, taxas de ventilação.

ABSTRACT

In a tropical country like Brazil, with predominantly hot and humid climate, natural ventilation emerges as a viable strategy to improve the population's quality of life and comfort within buildings, without adversely impacting the environment. This bioclimatic approach also hinders the spread of infectious diseases, such as Covid-19, promoting healthy environments. However, this factor is often overlooked by designers during the conception phase of a building, particularly in Social Housing (SH) due to the challenge in predicting wind behavior and ensuring adequate ventilation. This study aimed to estimate natural ventilation rates in an SH model located in Londrina, Paraná. The tracer gas method was employed, using CO_2 from a cylinder. Data collection was conducted using NDIR sensors, and the data were processed through two calculation methods: multipoint and 2-point. Three ventilation scenarios were analyzed, revealing significant variations in ventilation rates. The study concluded that the housing unit meets Brazilian regulatory criteria concerning the minimum opening area for ventilation and emphasizes the importance of incorporating natural ventilation in building design.

Keywords: natural ventilation, tracer gas, Social Housing, ventilation rates

1. INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta um déficit habitacional expressivo. Para suprir essa demanda, tem-se implementado em todo território nacional programas que fomentem a construção de Habitações de Interesse Social (HIS), como por exemplo o Programa Minha Casa Minha Vida (2009 a 2020 e 2023 até a data atual).

Segundo Lamberts et al. (2014) o Brasil, por se localizar entre dois trópicos e devido ao seu imenso território, possui um clima intensamente variado, mas em grande parte do território nacional o clima quente e úmido é predominante. Por outro lado, principalmente nas HIS observa-se que as estratégias bioclimáticas, como a ventilação natural, são pouco presentes, embora seja indicada como a principal estratégia para a maioria dos climas brasileiros.

Pode-se definir a ventilação natural como o deslocamento do ar através do edifício, passando pelas aberturas, algumas atuando como entrada e outras, como saída (FROTA e SCHIFFER, 2001). Portanto, as aberturas para ventilação deverão estar dimensionadas e posicionadas de modo a proporcionar um fluxo de ar adequado ao recinto. A ventilação natural em edificações pode atender a diferentes objetivos. Para Bittencourt e Cândido (2005), são três os principais: promover qualidade do ar interno, auxiliar na manutenção do conforto térmico dos ocupantes, e resfriar os edifícios.

Apesar de ser de suma importância, projetar uma ventilação natural eficiente não é uma tarefa simples, devido às características estocásticas do vento. Existem modelos empíricos para previsão de fluxos de ar, como os apresentados por Lamberts et al (2014), mas que demostram certa generalização com os dados. Outra forma de verificação, é a medição das taxas de ventilação in loco. Taxas de ventilação são um dos mais importantes parâmetros relacionados à qualidade interna do ar. Há, em diferentes países, diversas normas que tratam de parâmetros de ventilação, a exemplo da norma estadunidense 62.1-2019 ASHRAE, que estabelece taxas mínimas de ventilação de acordo com o uso do ambiente e a idade dos ocupantes de ambientes condicionados (ASHRAE, 2019).

A norma brasileira NBR 16401-3 apresenta requisitos de vazão de ar exterior requerida seguindo a metodologia da norma 62.1 ASHRAE. A vazão eficaz mínima de ar exterior é definida em três diferentes níveis, nas unidades $L.s^{-1}.pessoa^{-1}$ e $L.s^{-1}.m^{-2}$. Tanto área quanto ocupação prevista devem ser considerados para a composição da taxa recomendada para os recintos. Entretanto, a norma não estabelece critérios para ambientes residenciais. Autores como Carrer et al. (2015) destacam a dificuldade de se adotar uma taxa mínima universal de ventilação com propósitos regulatórios, já que a demanda de renovação de ar está relacionada aos riscos de exposição de cada ambiente. Diversos métodos já foram propostos para determinação dessas taxas, porém sem padronização generalizada (MORAWSKA et al., 2021). Os mais aceitos pela comunidade acadêmica são baseados na medida da concentração de gases traçadores, com procedimentos descritos em normas como ASTM E741 (2017) e ISO 12569 (2017) (PERSILY, 2016; SANDBERG et al., 2008).

Gás traçador é uma substância que pode ser misturada ao ar e medida em baixíssimas concentrações. Ao se considerar uma distribuição uniforme do gás no ambiente, a partir dos princípios de balanço de massa, ou de análise do equilíbrio, é possível determinar sua taxa de ventilação, considerando que o traçador será retirado do ambiente junto com o ar (PERSILY, 1997).

Diversos gases são adequados para esse propósito. No passado o uso do SF_6 era convencional, porém devido a seu elevado potencial de efeito estufa seu uso tem sido desencorajado (ALMEIDA, BARREIRA e MOREIRA, 2020). De acordo com a ISO 12569 (2017), o SF_6 possui potencial de efeito estufa 23900 maior que o CO_2 para uma mesma massa. Cui et al. (2015) recomendam a adoção do CO_2 como gás traçador, por apresentar custo relativamente baixo e possuir menor impacto ambiental quando comparado a outros gases (PFT's, N_2O, C_2H4, SF_6).

Entretanto, a adoção do CO_2 demanda atenção com alguns pontos, uma vez que, por estar presente na atmosfera, é necessário medir e considerar a concentração de fundo. Além disso, por ser um subproduto do metabolismo humano, é necessário controlar a ocupação do recinto estudado.

No passado os instrumentos necessários para a medição da concentração de CO_2 eram de difícil acesso, sendo necessário tomar amostras de ar em intervalos predefinidos para análise laboratorial. Hoje os sensores baseados na tecnologia de infravermelho não dispersivo (NDIR) são portáteis, podem registrar dados continuamente, além de possuir valor mais acessível.

A existência de lacunas no conhecimento científico acerca do fenômeno da ventilação natural em edificações é destacada por diversos autores (FAN et al., 2021; HEISELBERG e SANDBERG, 2006; PERSILY, 2016). Muitos trabalhos foram realizados em ambientes com ventilação controlada e mecânica. Ambientes de ventilação natural com grandes aberturas foram pouco investigados. A isso, soma-se o fato de que grande da literatura disponível na área está concentrada na Europa, Estados Unidos e mais recentemente

China (NAZAROFF, 2021). Portanto, seguem necessárias investigações em diferentes climas e sistemas construtivos empregados no Brasil.

Nesse trabalho, foi avaliada a ventilação natural de um protótipo de Habitação de Interesse Social (HIS) localizado na Universidade Estadual de Londrina. Os dados obtidos, além de elucidar condições de ventilação que podem ser estendidas a outras HIS com condições similares no país, também possibilitam o estudo comparativo com simulações computacionais, viabilizando estudos com diferentes configurações de habitação.

2. OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é medir as taxas de ventilação natural em um protótipo de Habitação de Interesse Social através do método de gás traçador e verificar sua aplicabilidade em ambientes amplamente ventilados de climas subtropicais.

3. MÉTODO

Para que fosse cumprido o objetivo no estudo, utilizou-se como base um protótipo habitacional em Wood Frame construído no campus da Universidade Estadual de Londrina, onde funciona o Laboratório de Eficiência Energética e Sustentabilidade em Edificações.

3.1. Apresentação do local de estudo

O local estudado consiste em uma habitação unifamiliar construída nos parâmetros do programa Minha Casa Minha Vida da Caixa Econômica Federal. Ela possui uma área total de 40,55m², e um pé direito de 2,55m. A Figura 1 mostra o protótipo construído e a Figura 2 sua planta baixa.



Figura 1 – Vista da HIS (Autores)

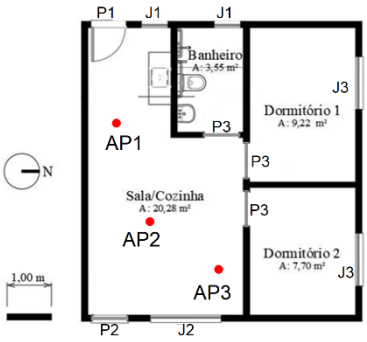


Figura 2 - Planta Baixa (Adaptado de Nunes et al, 2020)

A habitação apresenta dois quartos, sendo o quarto 1 com 9,22 m² e o quarto 2 com 7,70 m², um banheiro acessível medindo 3,55 m², e uma ambiente integrado que contém a sala e a cozinha cuja área é 20,28m², conforme Figura 2, que também apresenta a posição dos medidores de CO_2 durante os ensaios (AP1, AP2, AP3).

O ambiente escolhido para a medição é o integrado, sala/cozinha, que possui aberturas em duas fachadas opostas, assim foi possível analisar a ventilação cruzada. O ambiente apresenta a janela de correr na sala (J2), com dimensões de 1,60 X 1,20 m, e área livre (A_f) de 0,78 m². A porta da cozinha P1 é do tipo ventilada, possui orifícios na porção inferior, e tem dimensões livres de 0,77 X 2,07 m quando totalmente aberta.

Na fachada oposta há uma janela máximo ar (J1) onde fica a cozinha, com dimensões livres de 0,50 X 0,53 m. A determinação da área de esquadrias em que a folha interfere no fluxo do ar, como basculantes e máximo-ar é problemática (JONES et al., 2016). O ângulo de abertura máximo de J1 é de 56º, posição mantida nos ensaios em que esta janela esteva aberta, e que interfere o coeficiente de descarga Cd da abertura, que pode ser interpretado como uma medida da eficiência aerodinâmica das esquadrias (SHARPE et al., 2021). Apesar de autores como Fernandes et al. (2020) indicarem que o valor de C_d é influenciado por diversos parâmetros, como ângulo de incidência do vento, geometria, número de Reynolds, área de abertura, direção do fluxo de ar entre outros, é comum a adoção de valor de 0,61 para esquadrias simples, como portas e as janelas de correr. Para a esquadria J1, o valor de C_d calculado de acordo com método proposto por Sharpe et al. (2021) é de 0,58, o que indica pouca influência da folha da esquadria no fluxo, em comparação com C_d de 0,61 para orifício com as mesmas dimensões. A área efetiva A_{eff} de cada esquadria foi calculada a partir da multiplicação de A_f por C_d.

Neste recinto, ensaios de decaimento de gás traçador com CO_2 injetado a partir de cilindro foram executados em três configurações de abertura. Em todos os casos a porta principal (P2) e internas (P3)

estiveram fechadas. As janelas dos quartos (J3) e do banheiro (J1, idêntica à da cozinha) também estavam fechadas. Mediu-se a taxa de infiltração (INF), com todas as esquadrias fechadas em três ensaios, além quatro ensaios de ventilação cruzada (VC) e três de ventilação unilateral (VU). No cenário VC, estavam abertas as esquadrias P1 e J1 da cozinha, a Oeste, e J2 da sala, a Leste; à Oeste a soma de A_{eff} foi de 1,15 m², e à Leste de 0,48 m², o que corresponde a área efetiva para aberturas em série A_{effs} de 0,43m², conforme procedimento e nomenclatura de áreas propostos por Jones et al. (2016). No cenário VU somente J2 estava aberta, ou seja, a A_{eff} foi de 0,48 m².

3.2 Caracterização climática

A cidade de Londrina, de acordo com a NBR: 15220, está localizada na zona bioclimática 3, caracterizada por possuir um clima quente e úmido no verão e inverno seco e ameno (ANBT, 2005). Segundo a classificação de Köppen Londrina apresenta um clima do tipo Cfa. Além disso, estação meteorológica distante 5 quilômetros do edifício de estudo de caso registrou entre 1976 e 2019 intensidade média do vento a 10 metros de altitude (v_{10m}) como 2,6m/s, e direção predominante Leste, conforme a Tabela 1 e Figura 3 **(**IDR-PR, 2022).

Tabela 1 – Normais climatológicas de Londrina – IDR-PR (2022).

ESTACAO: LONDRINA / CODIGO: 02351003 / LAT: 23.22 S / LONG: 51.10 W / ALT: 585 M — PER. 1976/2019

	TEMPERATURA DO AR (.c)						U.REL	VENTO		PRECIPITACAO				EVAPOR.	INSOL.
MES	média máxima	média mínima	máxima abs	ano	min abs	ano	média comp	média %	dir pr.	m/s	total	máxima 24h	ano	dias chuva	total mm	total horas
JAN	29,5	19,7	36,4	93/19	11,0	1980	23,9	77	E	2,4	223,9	232,8	2016	16	104,5	202,7
FEV	29,8	19,7	38,0	2014	12,2	1987	24,0	76	E	2,2	187,1	93,6	1993	14	93,9	191,5
MAR	29,6	18,9	37,0	2005	7,0	1987	23,5	73	E	2,2	137,6	124,6	1992	12	114,2	220,1
ABR	28,0	16,8	34,9	2016	3,8	1999	21,7	71	E	2,2	108,0	151,2	1984	8	109,5	228,3
MAI	24,4	13,7	32,5	2019	0,0	1979	18,4	74	E	2,1	116,6	87,6	2016	8	91,0	212,7
JUN	23,1	12,1	30,3	2002	-1,0	1994	17,0	75	E	2,0	94,5	200,5	2012	8	78,7	203,2
JUL	23,6	11,7	31,2	1977	-1,3	2000	17,0	69	E	2,2	71,3	91,8	2015	6	104,4	229,8
AGO	25,9	12,9	34,8	1994	0,6	1984	18,8	62	E	2,4	54,1	91,4	2018	6	144,4	240,7
SET	26,9	14,7	37,5	1988	1,9	2002	20,3	63	E	2,7	115,1	82,8	1998	9	151,6	205,9
OUT	28,8	16,9	38,5	2014	8,0	1981	22,3	66	E	2,8	152,2	106,4	1994	11	156,7	220,6
NOV	29,4	18,0	39,2	1985	9,8	1976	23,2	67	E	2,8	165,6	142,7	1992	11	149,1	226,5
DEZ	29,5	19,2	36,4	1985	12,0	2001	23,8	72	E	2,5	205,8	117,1	1989	14	124,5	213,5
ANO	27,4	16,2					21,2	70,5			1632			122	1423	2596
EXT			39,2	1985	-1,3	2000						232,8	2016			

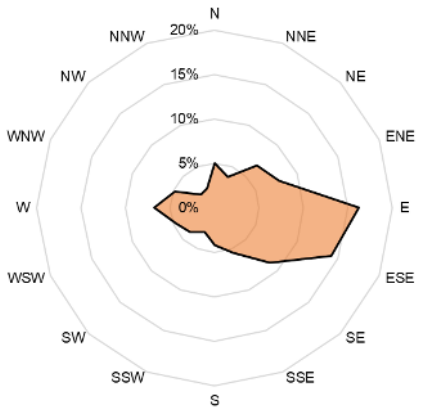


Figura 3 – Direções predominantes do vento em Londrina. Gráfico rosa dos ventos (IDR-PR, 2022)

3.3 Materiais

O gás traçador escolhido foi o gás carbônico, por seu baixo custo e menor impacto ambiental. Além das indicação das normas ISO 12569 (2017) e ASTM E741 (2017) outras pesquisas utilizaram o gás como Cui et al. (2015) e Remion, Moujalled e El Mankibi (2019). Utilizou-se, para tanto, um cilindro de capacidade nominal de 4kg, com duas válvulas para o controle da vazão. A Figura 4 apresenta o cilindro.



Figura 4 – Cilindro de CO_2 (Autores)



Figura 5 – Medidor de CO_2 (Autores)



Figura 6 – Montagem tripé (Autores)

A concentração do gás foi registrada durante os experimentos com auxílio de três detectores de CO_2 com termo-higrômetro, modelo NDC02 da marca Next Instrumentos, adquiridos em 2022 com sistema de calibração automática pela curva ABC. Os sensores de gás carbônico são baseados na tecnologia de infravermelho não dispersivo (NDIR), possuem tempo de resposta menor que 5 segundos e realizam medições na faixa entre 0 e 9999ppm, com 1 ppm de resolução e precisão reportada pelo fabricante de ±50ppm ±5% da leitura. A Figura 5 apresenta um dos equipamentos.

Os equipamentos foram montados sobre tripé metálico, em altura fixa igual a 1,2 metros, na zona de respiração dos indivíduos sentados. A Figura 6 apresenta um conjunto de sensor e tripé. Nos ensaios de decaimento, também foi utilizado ventilador portátil e de teto para, quando necessário, garantir a uniformidade do gás traçador antes do início do decaimento.

3.4 Procedimentos

Os ensaios foram conduzidos utilizando CO_2 injetado no ambiente a partir do cilindro, sem ocupantes, em três configurações predeterminadas de abertura, conforme citado acima, utilizando a técnica de decaimento. Este é o método mais convencional, abordado por diferentes normas internacionais (ISO 12569, ASTM E741), com precisão e aplicabilidade reconhecidas.

3.4.1 Ensaio de decaimento com cilindro

Os itens listados no fluxograma abaixo, na Figura 7, elucidam as etapas da medição do decaimento do gás.

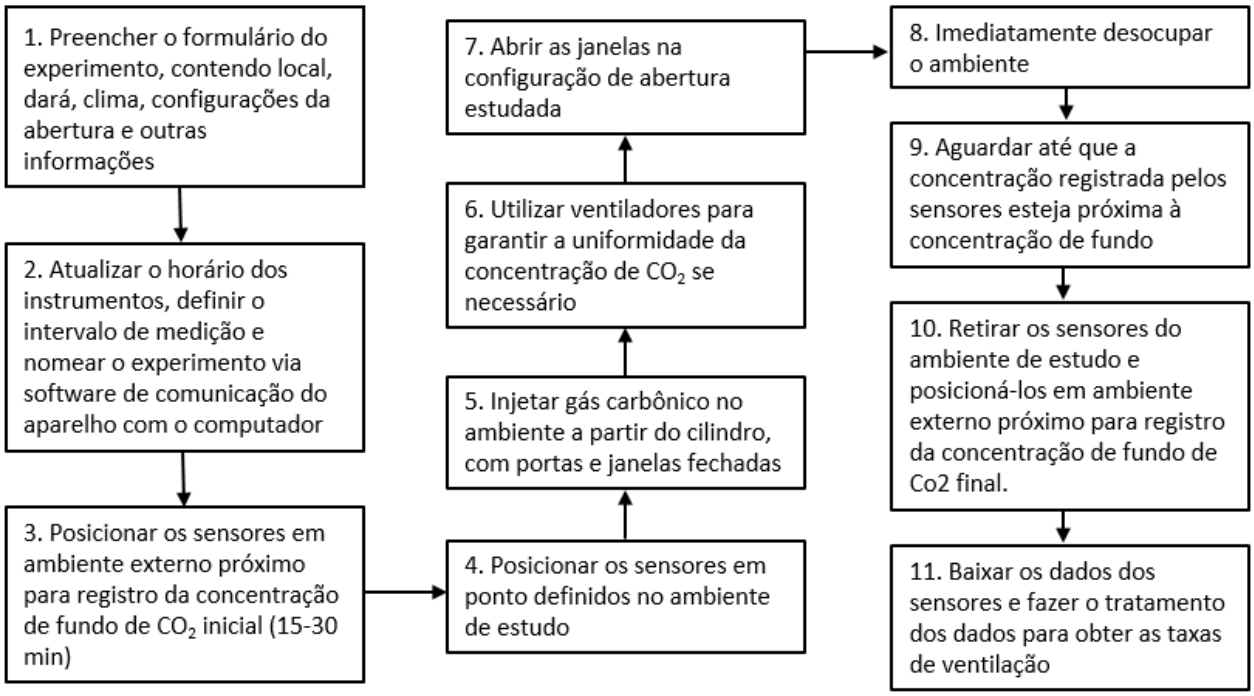


Figura 7 – Etapas do procedimento de medição (Autores)

A norma ISO 12569 apresenta duas formas de cálculo da taxa de ventilação a partir dos ensaios de decaimento de gás traçador: o método de dois pontos e o método multipontos. O primeiro calcula a taxa de

ventilação média do experimento com base nas concentrações inicial e final do decaimento, enquanto o segundo realiza uma regressão considerando diversos pontos da curva de decaimento. Ambas as taxas de ventilação são referentes ao mesmo intervalo. Este estudo fará a comparação dos dois métodos para verificar sua aplicabilidade.

De acordo com as normas ISO 12569 (2019) e ASTM E741 (2017), para que se possa aplicar a estratégia de decaimento multipontos é necessário que a taxa de ventilação seja aproximadamente constante ao longo do período de decaimento. Essa condição foi verificada para cada ensaio plotando-se o logaritmo natural da concentração de CO_2 em função do tempo. A existência de relação linear indica que o pré-requisito foi atendido, caso contrário, recomenda-se a regressão entre somente dois pontos. Nota-se que ao se estudar cenários com ventilação natural, é esperado que haja flutuações na taxa de ventilação, o que em primeiro momento desencorajou a aplicação do método multipontos.

É preciso ter em mente, porém, que o intervalo de confiança dos resultados obtidos pelo método multipontos é mais estreito, justamente por considerar diversas amostras durante o decaimento. Como consequência o método multipontos retorna resultados mais precisos, ainda que enviesados, sendo frequentemente utilizado em estudos, mesmo em situações com ventilação natural (CUI et al., 2015). Sherman (1990) sugere que a redução da confiança estatística é a consequência da obtenção de um resultado não enviesado gerado pelo método de dois pontos.

A Equação 1 é apresentada pela norma ISO 12569 (2019) para determinar a taxa de ventilação, em número de trocas de ar por hora pelo método de dois pontos.

$$\overline{N} = \frac{1}{t_2 - t_1} * ln\ \frac{C(t_1)}{C(t_2)} \qquad \text{Equação 1}$$

Onde:

$\overline{N}$ é a taxa de troca de ar [1/h];

t_1 é o instante inicial do decaimento [h];

t_2 é o instante final do decaimento;

$C(t)$ representa a concentração de gás traçador no instante t [ppm].

É importante ressaltar que, durante o período inicial após a operação das esquadrias para a configuração desejada, o decaimento ainda não segue uma curva logarítmica, uma vez que a ventilação se encontra em um estado transiente, isto é, variando temporalmente desde a infiltração até atingir a taxa correspondente à configuração almejada. Por essa razão, o instante inicial do decaimento deve ser determinado a partir da análise do gráfico de $C(t)$ de cada ensaio, excluindo-se os minutos iniciais desse período transiente

O instante inicial foi determinado a partir da apreciação do gráfico de $C(t)$ de cada ensaio, evitando os minutos iniciais após a operação das esquadrias para a configuração desejada. Neste curto intervalo o decaimento ainda não segue uma curva logarítmica, uma vez que a ventilação se encontra em um estado transiente; ou seja, está variando no tempo, desde a infiltração até atingir a taxa de fato registrada pelo ensaio.

Antes de aplicar a equação, porém, foi preciso considerar que ela foi desenvolvida para outros gases traçadores, que não estão presentes em quantias significativas na atmosfera. Este não é o caso do CO_2, de forma ser necessário descontar a concentração de fundo (aqui denotado C_{bg}, do inglês background concentration). O valor de C_{bg} foi calculado a partir da média das concentrações de fundo inicial e final, medidas no corredor externo, nas imediações da habitação. Destaca-se que esse procedimento foi realizado de forma individual para cada um dos três sensores utilizados para coletar dados durante os ensaios.

O período de decaimento foi considerado finalizado quando se atingiu concentração média de 600ppm no recinto. Esse critério não é determinado em norma. Apenas é necessário que a concentração mínima utilizada no cálculo esteja suficientemente acima da concentração de fundo, para evitar erros advindos da perda de precisão do sensor quando próximo ao limite inferior de sua faixa de operação (ASTM, 2017; EUROPEAN STANDARDS, 2017).

Enquanto isso, também substituindo o termo original $C(t)$ por $\Delta C(t)$, o número de trocas de ar por hora obtido pelo método multipontos foi calculado conforme a Equação 2 a seguir.

$$N = \frac{\left\{\left(\sum_{j=1}^{np} t_j\right) \sum_{j=1}^{np} ln[\Delta C(t_j)]\right\} - \left\{n_p \sum_{j=1}^{np} t_j n[\Delta C(t_j)]\right\}}{\left(n_p \sum_{j=1}^{np} t_j^2\right) - \left(\sum_{j=1}^{np} t_j\right)^2} \qquad \text{Equação 2}$$

Onde:

N é o número de trocas de ar por hora [1/h],

t_j é o período entre t_1 (igual a zero) e o instante j [h],

n_p é o número total de amostras consideradas.

Os resultados foram analisados a partir da ASHRAE 62.1 (2019), na ausência de uma norma brasileira específica para taxas de renovação de ar e da NBR 15575, que trata do tamanho das aberturas. Nenhuma das

duas normas é adequada para analisar as taxas de uma habitação ventilada naturalmente no Brasil, no entanto são alguns valores referencias.

4. RESULTADOS

As Figuras 8 a 11 apresentam gráficos de concentração de CO_2 de quatro dos dez ensaios de decaimento. Cada linha representa a concentração registrada por um dos aparelhos, posicionados de acordo com a Figura 2. As linhas vermelhas são referentes ao AP1, azuis ao AP2 e verdes ao AP3. Os instantes inicial e final de decaimento estão salientados pelas linhas pontilhadas verticais.

As Figuras 8 e 9 registram duas amostras no cenário de ventilação cruzada (VC), sob diferentes condições do tempo durante o decaimento, com intensidades médias do vento a 10 metros de 1,7 m/s e 3,2 m/s respectivamente, medidas pela mesma estação meteorológica adotada para caracterizar o clima. Neste cenário essa variação da intensidade do vento se reflete na duração do experimento, respectivamente 23 e 7 minutos, e consequentemente na taxa de ventilação N registrada; de 6,3 h^{-1} e 24,2 h^{-1} pelo método dois pontos e 6,2 h^{-1} e 20,6 h^{-1} pelo multipontos. Essas foram as duas amostras de VC com os valores extremos N. As outras duas amostras apresentaram taxas de 8,6 h^{-1} e 13,1 h^{-1} pelo método dois pontos e 8,3 h^{-1} e 13,9 h^{-1} pelo método multipontos, como registra a Figura 12, com v_{10m} respectivas de 1,7 m/s e 2,2 m/s durante o decaimento.

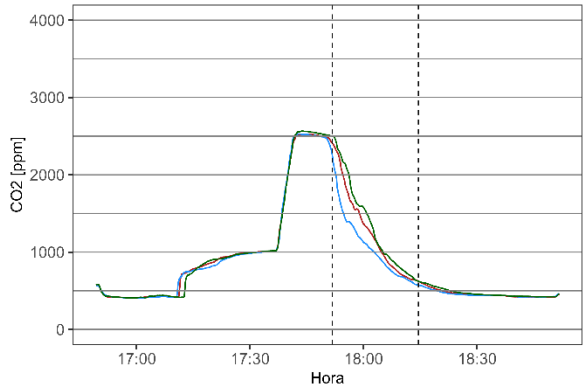


Figura 8 – Ensaio VC 23/05/2022 (Autores)

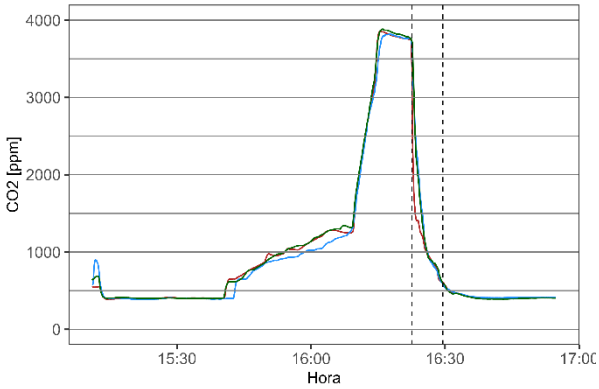


Figura 9 – Ensaio VC 25/05/2022 (Autores)

Enquanto isso, a Figura 10 apresenta a concentração ao longo de uma das três amostras do cenário VU, com duração de 34 minutos, e N de 4,5 h^{-1} e 4,2 h^{-1} pelos métodos dois pontos e multipontos. Foi a amostra que registrou maior taxa de ventilação neste cenário, e consequentemente mais curta, enquanto as demais foram de 2,0 h^{-1} e 2,6 h^{-1} pelo método dois pontos. A Figura 11 apresenta um dos três ensaios de infiltração, que registraram N entre 0,25 h^{-1} e 0,37 h^{-1}. Nesta situação o ensaio de decaimento dura várias horas. Por esse motivo, chama-se atenção ao eixo horizontal, do tempo, ser diferente entre os cenários apresentados.

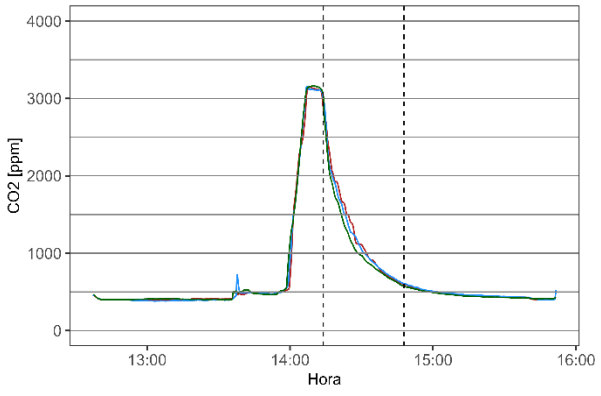


Figura 10 – Ensaio VU 06/06/2022 (Autores)

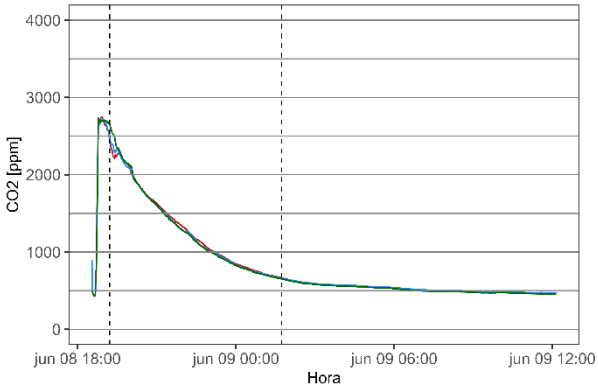


Figura 11 – Ensaio INF 08/06/2022 (Autores)

Em todo caso o decaimento ocorreu seguindo a curva de decaimento logarítmico, sem problemas de uniformidade entre os sensores nos períodos inicial e final de decaimento. A Figura 12 a seguir apresenta a taxa calculada para cada ensaio, obtida pelos dois métodos propostos. As barras em verde representam amostras na configuração VC, em amarelo VU e em cinza INF. À direita, em tonalidade mais escura, resultados pelo método multipontos, e à esquerda, com tonalidade clara, pelo método dois pontos. A barra vermelha representa a incerteza estimada para o valor registrado pelo método multipontos, obtida conforme aplicação

do anexo F da ISO 12569 (2017). A Figura 13 ao lado apresenta box-plot desses resultados agrupados por configuração de abertura.

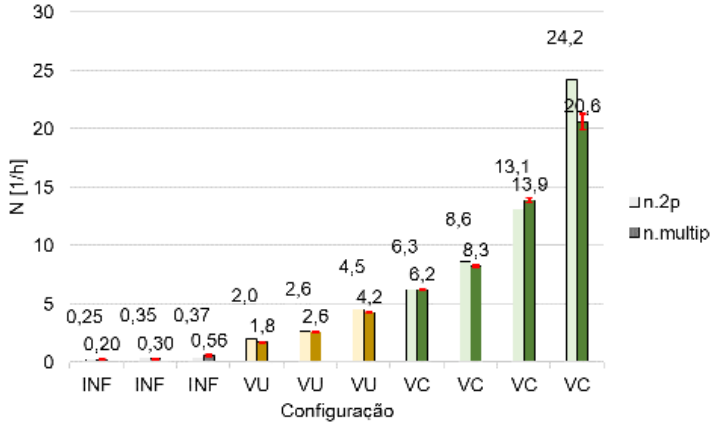


Figura 12 – Taxa de ventilação calculada em cada amostra (N [h^{-1}])

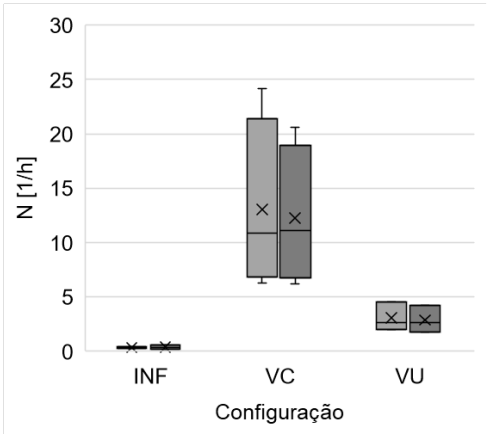


Figura 13 – Taxa de ventilação por configuração de abertura

A norma estadunidense ASHRAE 62.1 (2019) sugere taxa de ventilação mínima de 0,3 Ls^{-1}m^{-2}, como o recinto tem área de 20,3 m², o parâmetro equivale a 6,1 L/s. Como o volume do recinto é de 51,7 m³, isso equivale a N mínimo do de 0,42 h^{-1}, similar a critérios estabelecidos por países europeus, que variam entre 0,3 h^{-1} e 1 h^{-1} (NAZAROFF, 2021).

Não há, nas normativas brasileiras, critérios para taxa mínima de ventilação em residências, porém, antes de comparar os resultados obtidos com referências internacionais, é preciso ter claro que o papel da ventilação natural nas edificações varia conforme o clima do local. Em ambientes com clima mais frio é comum a necessidade sistemas de aquecimento artificial para garantir o conforto térmico dos ocupantes, portanto a tendência é a vedação dos envelopes das edificações, visando minimizar trocas de ar com o exterior, e consequentes perdas de calor. Nesse contexto são definidas taxas mínimas de ventilação para a manutenção da qualidade do ar interno (IAQ).

Enquanto isso, a ventilação natural como estratégia bioclimática apresenta enorme potencial de aplicação para os climas brasileiros, tanto para promover conforto térmico quanto para melhorar o desempenho termoenergético das edificações. A noma NBR 15220-3 apresenta diretrizes construtivas para habitações unifamiliares, como a HIS do estudo de caso, e recomendam a ventilação cruzada para 7 das 8 zonas bioclimáticas (ZB) do país, o que corresponde a mais de 99% do território nacional (ABNT, 2005).

A comparação dos resultados obtidos com as normativas internacionais indica, portanto, que no cenário VU, quando somente a janela da sala esteve aberta, as taxas medidas, entre 2,0 h^{-1} e 4,5 h^{-1}, estão muito acima do mínimo necessário para se garantir a qualidade do ar. Mesmo o cenário de infiltração atende aos critérios de alguns países, com N médio de 0,33 h^{-1}. Isso indica que garantir taxas adequadas de ventilação em habitações unifamiliares não é difícil do ponto de vista da IAQ. Entretanto, conforme discutido, simplesmente atender aos critérios de taxa mínima estabelecidos em outros contextos climáticos não garante que a estratégia de ventilação do recinto seja adequada do ponto de vista do conforto e desempenho térmico.

Apesar de não haver taxa mínima de renovação de ar determinada por normas, a NBR 15575-4 apresenta critérios para os sistemas de vedações verticais de edificações, e contém critério para percentual mínimo de abertura para ventilação de unidades habitacionais de acordo com sua área de piso e zona bioclimática, definida pela supracitada NBR 15220-3 (ABNT, 2020b; ABNT, 2005).

Para a ZB3, onde se insere a edificação estudada, a norma requer "área efetiva de abertura para ventilação" mínima de 7% da área do piso do ambiente de permanência prolongada (APP) em questão. Cabe uma desambiguação de terminologias, pois a norma se refere ao somatório do que neste trabalho se trata por "área livre" A_f, que é diferente do conceito de "área efetiva" A_{eff}, que considera a influência do coeficiente de descarga C_d. O problema com o uso ambíguo na terminologia de áreas de aberturas foi previamente descrito por Jones et al. (2016), que defende a padronização dos termos empregados em estudos de ventilação natural, aqui adotados.

Para o APP avaliado, a sala/cozinha, essa área é o somatório de A_f das esquadrias P1, P2, J1 (cozinha) e J2, que totaliza 4,19 m², bastante superior a 1,46 m², 7% da área do piso. Entretanto esse valor considera as portas externas abertas, o que está previsto na norma, porém pode não ser viável que na prática essa esquadria seja aproveitada para ventilação em alguns contextos devido a questões de segurança. Caso se considerasse somente as áreas das janelas, o somatório de A_f do recinto seria de 1,05 m². Ainda assim, com todas as esquadrias abertas, conclui-se que o critério normativo foi atendido. Em ambientes em que não se atende a esse critério, seria obrigatória a avaliação do desempenho térmico do ambiente por meio de simulação

computacional, conforme estabelecido pela NBR 15575-1 (ABNT, 2020a). O cenário VC estudado conta com somatório de A_f de 2,38 m², acima do critério, enquanto o cenário VU não atenderia ao valor estipulado, com A_f de 0,78 m², inferior a 1,46 m².

Portanto os critérios para ventilação natural para unidades habitacionais no país são estabelecidos não através de taxas mínimas, mas sim de áreas mínimas de abertura, definidas de acordo com as necessidades bioclimáticas das diferentes regiões do país (ABNT, 2020b). Apesar da NBR 15220-3 apresentar a ventilação cruzada como estratégia bioclimática, a NBR 15575-4 não diferencia critérios de áreas para ventilação cruzada e unilateral, ainda que a taxa de ventilação média – e consequentemente trocas térmicas – tenha variado 400% entre os cenários VC e VU, conforme resultados apresentados na Tabela 2 .

Tabela 2 – Taxa de ventilação média e somatório de área livre por configuração de abertura (Autores).

Configuração de abertura	N (2p) [1/h]	$\sum A_f$ [m²]	$N/\sum A_f$ [1/hm²]
INF	0,33	-	-
VC	13,03	2,38	5,5
VU	3,06	0,78	3,9

Mesmo com o pequeno número de amostras, é possível identificar que a razão N/A_f é superior nas amostras do cenário VC, o que indica que uma unidade extra de área de abertura implica maior taxa de ventilação neste caso quando em comparação à ventilação unilateral. Isso indica que seria proveitoso estabelecer critérios distintos de acordo com o tipo de ventilação, se cruzada ou unilateral, porém mais ensaios são necessários para estabelecer parâmetros concretos. Como os critérios da norma são estabelecidos conforme o somatório das áreas de abertura do recinto, mesmo que na configuração VU não se atenda à área mínima determinada, isso não implica a necessidade do procedimento de simulação computacional.

Como as áreas das portas internas não são contabilizadas para comparação com o critério da norma, para os quartos a única configuração de abertura possível seria de ventilação unilateral. O menor quarto apresenta área do piso igual a 7,7 m², portanto a área livre da abertura deve ser superior a 0,54 m², para atender ao critério de 7% definido para a ZB3. Também se atende ao critério, pois A_f neste caso é de 0,56 m², o que confirma que para essa UH, de acordo com a NBR 15575-1 não é necessário adotar o procedimento de simulação computacional de acordo com o critério de áreas mínimas de abertura de forma isolada.

Pontua-se que para ambientes com resfriamento artificial, a vedação do ambiente continua implicando menos perda de calor para o ambiente externo, e consequentemente menor consumo energético com o sistema de climatização; o que pode ser obtido simplesmente a partir do fechamento das esquadrias. Os ensaios de infiltração demonstraram que o sistema construtivo da HIS estudada é capaz de proporcionar boa vedação, N médio de 0,33 h^{-1}, próxima ao limite inferior para a taxa de ventilação de residências reportado por Nazaroff (2021) a partir de revisão sistemática com dados de mais de 10000 residências, com faixa de N entre 0,2 h^{-1} e 1 h^{-1}, ainda que esses valores tenham sido obtidos para ambientes com ventilação mecânica.

5. CONCLUSÕES

Tendo em vista os ensaios realizados foi possível uma melhor compreensão do fenômeno como estratégia de ventilação.

Em primeiro lugar, comparando-se as taxas de ventilação e as velocidades do vento na estação meteorológica, conseguiu-se verificar uma forte correlação entre o número de trocas de ar e a velocidade do ar. Nesta situação, onde a entrada de ar estava voltada para o vento dominante da região, este princípio parece funcionar, seja com ventilação cruzada, seja com unilateral. Aumentando-se a velocidade do ar, aumenta-se a taxa de ventilação.

Outro ponto a considerar é que ambos os métodos: dois pontos e multipontos se mostraram possíveis de serem utilizados neste tipo de edificação ventilada naturalmente e convergem seus resultados. No entanto, o método multipontos superestimou a taxa de ventilação em um dos experimentos de ventilação cruzada, justamente a que atingiu maior taxa, e isso deve ser levado em consideração. Acredita-se ser importante sempre calcular através dos dois métodos para verificar pontos divergentes.

É importante salientar que a normativa brasileira NBR 15575 deveria estabelecer mais claramente como realizar o cálculo das áreas de ventilação, padronizando-as de acordo com a literatura internacional, pois os resultados têm relação direta com este cálculo.

Ensaios futuros que meçam a taxa de ventilação dos quartos de forma isolada, além da UH como um todo são recomendados para melhor caracterização das condições de ventilação natural, incluindo repetições dos ensaios de decaimento em diferentes condições climáticas. A obtenção de dados de intensidade e direção do vento a partir de estação meteorológica mais próxima ao edifício de estudo de caso, associada à maior

número amostral, permitiria apreciação mais detalhada acerca da influência das condições climáticas nos dados obtidos. A título de validação pode-se também comparar os valores encontrados a simulações computacionais e modelos algébricos conhecidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais - Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2020a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-4**: Edificações habitacionais - Desempenho – Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas-SVVIE. Rio de Janeiro, 2020b.

ALMEIDA, R.; BARREIRA, E.; MOREIRA, P. A discussion regarding the measurement of ventilation rates using tracer gas and decay technique. **Infrastructures**, [s. l.], v. 5, n. 10, p. 1–13, 2020.

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Standart 62.1**: Ventilation for acceptable indoor air quality. [s. l.], 2019.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E741**: Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution. [s. l.], v. 17 , p. 1–17, 2017.

BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural.** 2. ed. Maceió: EDUFAL, 2005. 147 p.

CARRER, P. et al. What does the scientific literature tell us about the ventilation-health relationship in public and residential buildings? **Building and Environment**, [s.l.], v.94, p. 273-286, 2015.

CUI, S. et al. CO2 tracer gas concentration decay method for measuring air change rate. **Building and Environment**, [s. l.], v. 84, p. 162–169, 2015.

EUROPEAN STANDARDS. **BS EN ISO 12569:** Thermal performance of buildings and materials — Determination of specific airflow rate in buildings — Tracer gas dilution method. [S. l.]: BSI Standards, 2017.

FAN, S. et al. A full-scale field study for evaluation of simple analytical models of cross ventilation and single-sided ventilation. **Building and Environment**, Cambridge, v. 187, 2021.

FERNANDES, L. et al. Evaluación de los coeficientes de descarga de grandes ventanas que se pueden abrir utilizando muestras a escala real en ensayos en túneles de viento. Revista Ingeniería de Construcción, [S.L.], v. 35, n. 2, p. 203-214, ago. 2020.

FROTA, A.; SCHIFFER, S. **Manual de Conforto Térmico**. São Paulo: Studio Nobel, 2001. v. 5

HEISELBERG, P.; SANDBERG, M. Evaluation of discharge coefficients for window openings in wind driven natural ventilation. **International Journal of Ventilation**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 43–52, 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 12569: Thermal Performance of Buildings, Determination of Air Change in Buildings - Tracer Gas Dilution Method. ISO, Genève, Switzerland, 2019.

JONES, B. et al. A review of ventilation opening area terminology. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 118, p. 249–258, 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.02.053.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: [s. n.], 2014.

MORAWSKA, L. et al. A paradigm shift to combat indoor respiratory infection. **Science**, [s. l.], 2021.

NAZAROFF, W. W. Residential air-change rates: A critical review. **Indoor Air**, [s. l.], v. 31, n. 2, p. 282–313, 2021.

NUNES, G; SANCHES, G; GIGLIO, T. Análise do desempenho termoenergético de edificações residenciais em cross-laminated timber (CLT) no clima de Mato Grosso. Anais do Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Porto Alegre, 4 a 6 de novembro de 2020.

PERSILY, A. Evaluating Building IAQ and Ventilation with Indoor Carbon Dioxide. In: , 1997. **ASHRAE Transactions**. [S. l.], 1997. p. 12.

PERSILY, A. Field measurement of ventilation rates. **Indoor Air**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 97–111, 2016.

REMION, G.; MOUJALLED, B.; EL MANKIBI, M. Review of tracer gas-based methods for the characterization of natural ventilation performance: Comparative analysis of their accuracy. Building and Environment, [S.L.], v. 160, n. maio, p. 106180, 2019

SANDBERG, M. et al. Experimental methods in ventilation. **Advances in Building Energy Research**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 159–210, 2008.

SHARPE, P. et al. What we think we know about the aerodynamic performance of windows. **Energy & Buildings**, [s. l.], v. 231, n. 110556, 2021.

SHERMAN, M. H. Tracer-gas techniques for measuring ventilation in a single zone. **Building and Environment**, [s. l.], v. 25, n. 4, p. 365–374, 1990.