RENOVAÇÃO DO AR EM AMBIENTES RESIDENCIAIS TROPICAIS: COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS EMPÍRICOS PARA VENTILAÇÃO CRUZADA

Eleonora Sad de Assis (1); Nathália de Souza Mendes (2)
(1) Doutora em Arquitetura e Urbanismo, Professora, elsad@ufmg.br, UFMG/Escola de Arquitetura, Rua Paraíba, 697, 30130-141 Belo Horizonte, MG, (31)3409-8873
(2) Graduanda em Arquitetura e Urbanismo, nathalia.souzmendes@gmail.com, UFMG/Escola de Arquitetura, Rua Paraíba, 697, 30130-141 Belo Horizonte, MG, (31)9917-5703

RESUMO
A ventilação natural é muito adotada em edificações residenciais, porém há uma ampla variação das recomendações para a renovação do ar nos ambientes interiores e para a definição das áreas de aberturas para ventilação. O exame da literatura mostra que há diferenças expressivas entre as recomendações para climas temperados e frios, e para os climas quentes, úmidos e secos. Objetivou-se identificar as melhores recomendações para o dimensionamento de aberturas para ventilação natural em habitações mínimas, considerando a diminuição sistemática das áreas dos imóveis habitacionais. Foi usada como caso de estudo uma pequena moradia para até 4 pessoas projetada pelos estudantes em disciplina de projeto arquitetônico da Escola de Arquitetura da UFMG, em Belo Horizonte, MG. Alguns modelos empíricos mais confiáveis para ventilação por ação de ventos foram usados para os cálculos. Seis cenários de dimensionamento de aberturas foram comparados, levando em conta os requisitos de códigos de edificações, as recomendações das normas brasileiras para a zona bioclimática onde está a cidade e as várias taxas de ventilação indicadas na revisão da literatura. Os resultados mostram que taxas de ventilação entre 20 e 40 renovações de volume por hora em habitações mínimas produzem áreas de abertura para ventilação próximas àquelas dos códigos de edificações e da NBR-15220 para a zona bioclimática da cidade; além disso, o tipo de esquadria também parece influenciar no dimensionamento das aberturas para ventilação natural. Mais estudos devem ser feitos, abrangendo outros tipos de clima, o efeito das taxas de ventilação no resfriamento das habitações, bem como fazendo medições in loco e identificando as preferências regionais quanto à ventilação em habitações.

Palavras-chave: ventilação natural, taxas de ventilação, habitações.

ABSTRACT
Natural ventilation is often adopted in residential buildings, however there is a large variation about ventilation rates and window dimensioning. Literature review shows there are significant differences in recommendations for temperate and cold climates and for warm climates, both humid and dry ones. This paper aimed at identifying the best recommendations for dimensioning openings for natural ventilation in dwellings, having in mind the decreasing areas of dwellings in Brazil. A small detached house designed in the city of Belo Horizonte, Brazil, by students at the UFMG School of Architecture was used as a case study. Some reliable empirical models of wind pressure ventilation were applied for calculations. Six scenarios for dimensioning ventilation openings were compared taking into account building codes, recommendations by national standards and various ventilation rates found in the literature review. The results show that ventilation rates between 20 and 40 air changes per hour in small dwellings reach ventilation areas close to those from building codes and standard NBR-15220 for the city bioclimatic zone; in addition the type of window frame also seems to influence in dimensioning ventilation openings. Further studies need to be done considering other climatic zones, the effects of ventilation rates on the cooling of houses as well as making measurements in loco and researching about regional preferences for natural ventilation in dwellings.

Keywords: natural ventilation, ventilation rates, dwellings.

1. INTRODUÇÃO

A ventilação dos ambientes interiores visa promover a renovação do volume de ar de tal modo a garantir a qualidade do ar interno e a dissipação do calor, tanto aquele resultante das cargas térmicas internas quanto o calor transferido pelas envoltórias, sendo, portanto, também uma estratégia efetiva para o conforto térmico dos ocupantes.

A ventilação natural é considerada o meio mais adequado e econômico para ventilar edificações de pequeno a médio portes, como habitações, escolas, edifícios de escritórios e públicos, em climas amenos a moderados, desde que não haja impedimentos relativos a poluição local do ar, ruído excessivo no entorno e questões específicas ligadas à privacidade e segurança, visto que os edifícios ventilados naturalmente são mais abertos e permeáveis (LIDDAMENT, 1996; ALLARD, 1998). A ventilação natural depende de fatores fixos e variáveis para seu dimensionamento. Dentre os fatores fixos, estão a forma e orientação do edifício aos ventos, a presença de obstáculos e obstrução do entorno, a posição, tamanho e tipo das aberturas; dentre os variáveis, citam-se a velocidade, direção e frequência dos ventos locais; a diferença de temperatura do ar entre o exterior e o interior (TOLEDO, 2001).

Neste trabalho, interessa-nos tratar especificamente da ventilação em habitações, pois este tipo de edificação não somente constitui a maior parte dos edifícios que compõem uma cidade, como são aqueles onde as pessoas passam uma boa parte do tempo - inclusive para sua restauração física e mental - e são também aqueles que provavelmente sofrem os maiores impactos do adensamento e verticalização das áreas urbanas. Nas últimas décadas, imóveis habitacionais em algumas cidades do Brasil tiveram suas áreas reduzidas em cerca de 28% (TAVARES, 2013; WILTGEN, 2014), chegando a ser 50% menores se comparados aos imóveis habitacionais dos anos 1950 (VILLA *et al*, 2018). Acompanhando esta tendência, é igualmente possível observar a redução do tamanho das janelas e a simplificação do desenho delas, diminuindo as possibilidades de controle sazonal e o desempenho da ventilação natural (TABLADA *et al*, 2009; SACHT *et al*, 2017). Por outro lado, o aumento da rugosidade em áreas urbanas brasileiras pelo adensamento e verticalização sem considerar aspectos ambientais tem causado a diminuição da velocidade média do vento (FERREIRA e ASSIS, 2010; ROCHA e SALES, 2018), dificultando o tipo mais comum de ventilação das habitações urbanas, que é feita por meio da diferença de pressão nas fachadas.

Geralmente, a ventilação natural em habitações é tratada como um conjunto de boas práticas resultantes da experiência ou da análise de soluções da arquitetura vernacular em domínios climáticos variados (LIDDAMENT, 1996; BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2005; TABLADA *et al*, 2009; AHMED *et al*, 2021). Os requisitos são frequentemente prescritivos, no sentido de uma taxa mínima de renovação do volume de ar de um ambiente ou de um tamanho mínimo de aberturas. A grande maioria dos códigos de edificações brasileiros adotam este último, relacionando um tamanho mínimo de aberturas para ventilação e iluminação com uma fração da área de piso - o que provavelmente está muito mais ligado à iluminação do que propriamente à ventilação dos ambientes. De fato, não há qualquer relação da área de abertura assim determinada com o tipo de esquadria (que define as condições de efetivo acesso do ar), bem como com a orientação da edificação aos ventos dominantes locais, a eventual obstrução do entorno construído e o posicionamento da abertura no ambiente. Mesmo no caso da NBR-15220 (ABNT, 2005), que apresenta recomendações de tamanhos de aberturas para cada zona climática, com base nas Tabelas de Mahoney, tais recomendações aparecem como uma fração da área de piso, enquanto as mesmas recomendações no original das referidas Tabelas (UN, 1971) dizem respeito à área das paredes onde as aberturas se encontram.

Embora Bittencourt e Cândido (2005) considerem que a prescrição de taxas mínimas de renovação do ar em ambientes seja útil apenas como indicador da qualidade do ar no caso de climas tropicais, este pode ser um critério mais adequado do que a definição de um tamanho mínimo de aberturas, pois permite, em princípio, o dimensionamento das aberturas a partir de fundamentos de qualidade do ar e conforto térmico, considerando, pelo menos, as condições locais de velocidade e direção dos ventos, bem como o tipo de atividade que se desenvolve no ambiente.

Não há, entretanto, muita informação disponível ou consenso sobre as taxas de ventilação para habitações, no caso de serem ventiladas naturalmente. A maior parte da literatura vem de países de clima temperado ou frio, onde a ventilação residencial é feita mecanicamente e, desse modo, as taxas recomendadas são para tomada de ar fresco externo para fins de manter as condições higiênicas do ar no interior. Nestas condições, um levantamento das normas de ventilação e das recomendações dos códigos de edificações existentes nos países europeus (REHVA, 2012), mostra que as taxas variam de 0,5 a 1 renovação do volume de ar do ambiente por hora. Porém as avaliações feitas em edificações residenciais em vários desses países identificaram que, na maior parte das habitações, a taxa de renovação do ar ficava muito aquém das recomendações normativas, seja em função do mau dimensionamento ou do mau funcionamento dos sistemas de ventilação mecânica, mesmo nos edifícios mais modernos (REHVA, 2012; SEKHAR *et al*,

2020). Em outros documentos, como o BS-5925 (BSI, 1991) e o CIBSE Guide A (CIBSE, 2015) encontram-se as mesmas indicações de taxa mínima de 0,5 a 1 renovação por hora em habitações.

No caso americano, o Standard 62.1 (ANSI/ASHRAE, 2019) prevê para ambientes de estar até 1 l/(s.m^2) e para as cozinhas entre 1 e 2 l/(s.m^2); são taxas extremamente baixas, considerando que 1 l/s corresponde a 4,4 m^3/h. A TS-L1 (ATTMA, 2016) identifica como boa prática para ventilação natural em habitações uma taxa de renovação de 3 a 5 m^3/(h. m^2). Considerando que grande parte das habitações têm áreas relativamente pequenas, a renovação do ar considerando tais taxas cumpre apenas com o suprimento de ar fresco para ventilação higiênica, já que em climas frios a ventilação para extração de calor não apenas não é desejável para o conforto térmico, como também levaria a um consumo excessivo de energia para aquecimento do ar interior, havendo assim, uma grande preocupação, nestes países, com a estanqueidade ao ar dos componentes da construção e com a indesejada infiltração de ar externo ou vazamento do ar interno tratado.

Carrer *et al* (2015) fizeram uma extensa revisão da literatura e identificaram que taxas de ventilação de 6 a 7 l/s por pessoa são os valores mínimos para evitar efeitos negativos sobre a saúde das pessoas, sendo que alguns trabalhos sugerem que o mínimo seja de 10 l/s por pessoa (cerca de 36 m^3/h por pessoa) para se evitar sintomas típicos da chamada Síndrome dos Edifícios Doentes. Sekhar *et al* (2020) também revisaram a literatura, em busca de referências para taxas de ventilação em dormitórios. Verificaram que concentrações de CO_2 acima de 750 ppm nestes ambientes podem causar distúrbios no sono, com impactos na produtividade das pessoas; além disso, notaram que medições realizadas em dormitórios em lugares variados mostraram que aqueles com sistemas de ar condicionado chegavam a ter o dobro da concentração de CO_2 do que os naturalmente ventilados.

Em áreas tropicais, a ventilação higiênica não é suficiente, havendo também a necessidade da renovação do volume de ar para exaustão do calor acumulado dentro dos ambientes. Garde *et al* (1999; 2001) apresentam uma iniciativa piloto para a elaboração de uma norma (chamada EcoDOM) para o resfriamento natural e de baixo consumo energético das edificações residenciais dos territórios franceses ultramarinos, que estão localizados em regiões de clima quente e úmido. Um dos 5 pontos de prescrições da norma foi sobre a ventilação natural das habitações. Tais prescrições foram estabelecidas após o estudo de habitações típicas dos territórios, por meio de simulação computacional termo-energética. O documento define 3 tipos de fluxos de ventilação: fraco, de 1 a 2 renovações de volume por hora, para a manutenção de condições higiênicas do ar; moderado, de 40 renovações de volume por hora, para a exaustão dos ganhos internos de calor e resfriamento da envoltória, e forte, acima de 100 renovações de volume por hora, para o resgate do conforto térmico por meio dos processos de evapotranspiração do corpo humano. Adotou-se, na referida norma, uma taxa de renovação do ar de 40 volumes por hora, o que permite, segundo os autores, uma velocidade interna de 0,2 m/s a 0,5 m/s, considerada satisfatória para regiões onde a temperatura média do ar fica em torno de 32°C durante o dia. Com isso, definiram um percentual de aberturas de 25% em fachadas opostas, nos ambientes principais da habitação; igual percentual de aberturas deve ocorrer nas divisórias internas, para permitir a ventilação cruzada.

No Código Nacional de Edificações da Austrália (ABCB, 2010) uma área mínima de abertura de ventilação é especificada para ambientes residenciais, devendo ser de 5% da área de piso do ambiente. No caso de um ambiente receber ventilação através de outro, esses 5% se aplicam sobre a soma das áreas de piso dos dois ambientes. Daniel (2018), entretanto, defende que deve haver mais pesquisa sobre as preferências de conforto ambiental em habitações australianas. A autora observou que a faixa de conforto térmico dos moradores numa região de clima quente e úmido daquele país era muito mais ampla do que a indicada por meio do Standard-55 da ASHRAE, pois os moradores adotavam vários comportamentos adaptativos, como atividades ao livre, alteração de vestimenta e aumento do número de banhos. Com relação às moradias, as intervenções feitas pelos moradores visaram aumentar as aberturas de ventilação para alcançarem velocidades internas do ar de 1,0 m/s, sendo que em alguns casos as aberturas nem sequer tinham esquadrias, apenas telas mosquiteiras. Outras intervenções foram o isolamento térmico das coberturas e o acréscimo de varandas e pérgulas para aumentar o contato com o exterior.

Já o Código Nacional de Edificações da Índia (BSI, 2016) indica que taxas de ventilação entre 30 e 60 m^3/(h.m^2) são adequadas para a maioria das edificações do país. Shaikh *et al* (1992) compararam as taxas de ventilação medidas em habitações nos EUA com as que eles mediram em habitações indianas. As taxas nestas habitações variaram de 0,42 a 4,46 renovações de volume por hora, enquanto nas habitações americanas a variação foi de 0,03 a 1,6 renovações por hora. As taxas maiores em clima tropical eram esperadas, segundo os autores, pois a ventilação natural é mais usada durante a maior parte do tempo.

No Brasil, Mesquita *et al* (1977) compilaram as indicações de taxas de ventilação para vários tipos de ambientes. A Tabela 1 mostra os resultados para ambientes residenciais.

Tabela 1 – Taxas de ventilação para ambientes residenciais

Local	Fumo	Taxa de ventilação		
		m^3/h por pessoa		No. trocas/ hora
		mínima	recomendada	
Apartamentos populares	algum	26	34	
Apartamentos de luxo	algum	43	50	
Cozinhas				20 a 30
Residências: geral				05 a 20
Residências: sala jantar	algum			04 a 12

Fonte: Mesquita *et al* (1977), organizado pelas autoras.

De acordo com os autores, as trocas de ar de 8 volumes por hora são suficientes para remover contaminantes emitidos pelos ocupantes, como CO_2, fumo e odores, sendo o limite superior das faixas indicadas na Tabela 1 o recomendado para remover calor e vapor em regiões de clima temperado; em climas quentes sugerem adotar o dobro dos valores tabelados.

Não foram localizados trabalhos de medições das taxas de ventilação em habitações no Brasil. Krüger *et al* (1999) fizeram uma simulação computacional das taxas de ventilação de habitações térreas unifamiliares padrão COHAB, em situação de verão em Florianópolis, considerando uma velocidade média de vento externo de 3,3 m/s e a área efetiva de abertura para ventilação igual à metade da área da janela de cada ambiente (esquadrias de correr). Os autores observaram que a partir de uma taxa de 20 trocas de volume por hora não havia uma alteração significativa das temperaturas internas quanto ao resfriamento. Além disso, esta taxa de renovação só foi atingida quando o maior número de aberturas da habitação estava voltada para o vento predominante.

Amaral e Assis (2019) simularam as condições de ventilação natural em edifícios residenciais multifamiliares de 13 pavimentos, inseridos em entornos urbanos de alturas homogêneas ou variáveis, baseadas nas características morfológicas de cidades brasileiras. Foram usados modelos de fluidodinâmica computacional e o módulo *airflow network* do programa EnergyPlus® para obter a taxa média de renovação de ar na edificação em teste, com planta típica de 4 apartamento por andar. Os dados climáticos de Belo Horizonte foram usados, variando-se as direções de incidência de vento de acordo com as mais frequentes. Os autores observaram que a taxa média anual no primeiro pavimento foi da ordem de 2 renovações de volume por hora em entorno de altura homogênea e de cerca de 3 renovações de volume por hora em entorno de altura heterogênea, uma diferença de 23%; na altura do 7º pavimento tal diferença chegava a 40%. Apenas no último pavimento com entorno de altura heterogênea o número médio de renovações de volume por hora chegou próximo de 5, mostrando que o tamanho das aberturas de ventilação praticadas tipicamente podem não atingir as taxas de renovação de ar recomendadas para regiões tropicais em áreas urbanas bem desenvolvidas, ainda mais em locais com baixa velocidade média do ar, como no caso de Belo Horizonte.

1.1. Modelos empíricos para a estimativa do fluxo de ar por pressão de ventos nos ambientes interiores

Apesar do aumento da acessibilidade a modelos computacionais fluidodinâmicos e da maior precisão obtida com ensaios de modelos físicos reduzidos em tuneis de vento de camada limite atmosférica, os métodos empíricos simplificados podem ser usados na estimativa de ventilação natural em edificações residenciais, pois são de mais fácil e rápida aplicação, e ainda guardam um certo grau de precisão, desde que respeitadas as suas limitações (LIDDAMENT, 1996; BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2005). Tais modelos desconsideram as diferenças de temperatura do ar entre o exterior e o interior.

Assis e Ferreira (2006) compararam dados horários medidos de velocidade do ar no exterior e no interior de um ambiente térreo com aberturas em fachadas opostas com os resultados calculados para este mesmo ambiente usando modelos empíricos comumente indicados na literatura. Foram testados os modelos de ventilação por ação de ventos de Irminger e Nokkentued para ambientes de seção quadrada (TOLEDO, 1999; FROTA e SCHIFFER, 2001), que supõe esquadrias de correr ou de abrir; o de Aynsley (ALLARD, 1998; BITTENCOURT e CÂNDIDO, 2005) e o de Van Straaten (MASCARÓ, 1985), para esquadrias pivotantes horizontais. Os modelos mostraram forte relação com a variação externa da velocidade do ar e tenderam ao superdimensionamento da velocidade interna do ar. O modelo que apresentou o melhor resultado foi o de Aynsley, também comprovado por Allard (1998). O modelo de Irminger e Nokkentued foi o mais sensível às rajadas de vento. As velocidades internas médias, entretanto, aproximaram-se da média resultante dos dados medidos, bem como dos dados simulados usando modelos computacionais multizonais. Assim sendo, uma vez que os modelos empíricos estimam a taxa de ventilação, podem ser usados também para o dimensionamento das aberturas.

No modelo de Irminger e Nokkentued o fluxo de ar (ϕ), em m^3/s, é dado por:

$$\phi = Ca \times A_0 \times v \times \cos\theta \times (Ce - Cs)^{0,5} \quad \text{Equação 1}$$

Onde: C_a é o coeficiente de descarga (considerado o valor recomendado de 0,6); A_0 é a área equivalente das aberturas (área combinada de entrada e de saída do ar, em m²); v é a velocidade do vento externo, em m/s; θ é o ângulo entre a normal à fachada e a direção local do vento; Ce é o coeficiente de pressão na abertura de entrada de ar; e Cs é o coeficiente de pressão na abertura de saída de ar (ambos extraídos dos gráficos do modelo, em função das condições de obstrução do entorno e da posição das aberturas nas fachadas).

No modelo de Aynsley, o fluxo de ar (ϕ), em m^3/s, é dado por:

$$\phi = \{[(Cp_1 - Cp_{n+1}) \times V_z^2] / [1/(Cd_1^2 \times A_1^2)] + ... + [1/(Cd_n^2 \times A_n^2)]\}^{0,5} \quad \text{Equação 2}$$

Onde: Cp_1 é o coeficiente de pressão na abertura de entrada; Cp_{n+1} é o coeficiente de pressão na abertura de saída; Cd_1 é o coeficiente de descarga na entrada; Cd_n é o coeficiente de descarga na saída - ambos considerados 0,6, conforme a literatura; A_1 é a área de entrada, em m²; A_n é a área de saída, em m²; Vz é a velocidade de referência do vento ao nível da cobertura, em m/s.

No modelo de Van Straaten, o fluxo de ar (ϕ), em m^3/s, é dado por:

$$\phi = C_1 \times C_2 \times A \times v \times C_3^{0,5} \quad \text{Equação 3}$$

Onde: C_1 considera o efeito combinado de aberturas em série e da inclinação da bandeira pivotante em relação ao plano horizontal; C_2 representa o grau de obstrução dos edifícios vizinhos; C_3 o ângulo entre a normal à fachada e a direção local do vento; A é a área combinada de entrada e saída do ar, calculada com base na razão entre as áreas de entrada e de saída de ar, em m² (gráficos do modelo); v é a velocidade do vento no exterior, em m/s.

2. OBJETIVO

Objetiva-se comparar as áreas de aberturas para ventilação cruzada calculadas a partir dos modelos empíricos citados e a partir dos requisitos dos códigos de edificações e normas técnicas brasileiras, de modo a identificar as taxas de ventilação mais adequadas para habitações mínimas, considerando o caso da cidade de Belo Horizonte, MG.

3. MÉTODO

3.1. Apresentação do caso de estudo

A cidade de Belo Horizonte, capital do estado, está localizada na macrorregião central de Minas Gerais, em clima tropical de altitude. De acordo com o zoneamento bioclimático vigente (ABNT, 2005), está classificada na zona bioclimática 3 (figura 1), onde se recomenda aberturas médias para ventilação (15% a 25% da área de piso do ambiente).

A edificação analisada foi desenvolvida por aluna de graduação em arquitetura e urbanismo da UFMG, em disciplina de projeto de arquitetura (COSTA, 2019). Com área de $25m^2$, foi projetada como uma unidade para até 4 pessoas em um conjunto habitacional para moradia estudantil. Tal conjunto tinha como proposta ser implantado numa área do campus Pampulha da UFMG, em Belo Horizonte. O projeto da moradia foi analisado depois quanto ao conforto térmico e adequação à legislação urbanística local, sofrendo os ajustes necessários para ventilação natural, proteção solar e desempenho térmico das envoltórias (OLIVEIRA *et al*, 2020).

A moradia tem seu eixo longitudinal orientado no sentido nordeste-sudoeste (figura 2). Considerando que a direção predominante de vento em Belo Horizonte é leste durante o ano todo, as fachadas nordeste e sudeste estarão em pressão positiva e as fachadas sudoeste e noroeste estarão em pressão negativa durante boa parte do tempo.

Visto que os modelos empíricos simplificados apresentam os resultados para um cômodo de cada vez, foi selecionado o ambiente conjugado de cozinha e estar, com área de $9,6m^2$ e pé-direito de 2,6m para o estudo de dimensionamento de aberturas.

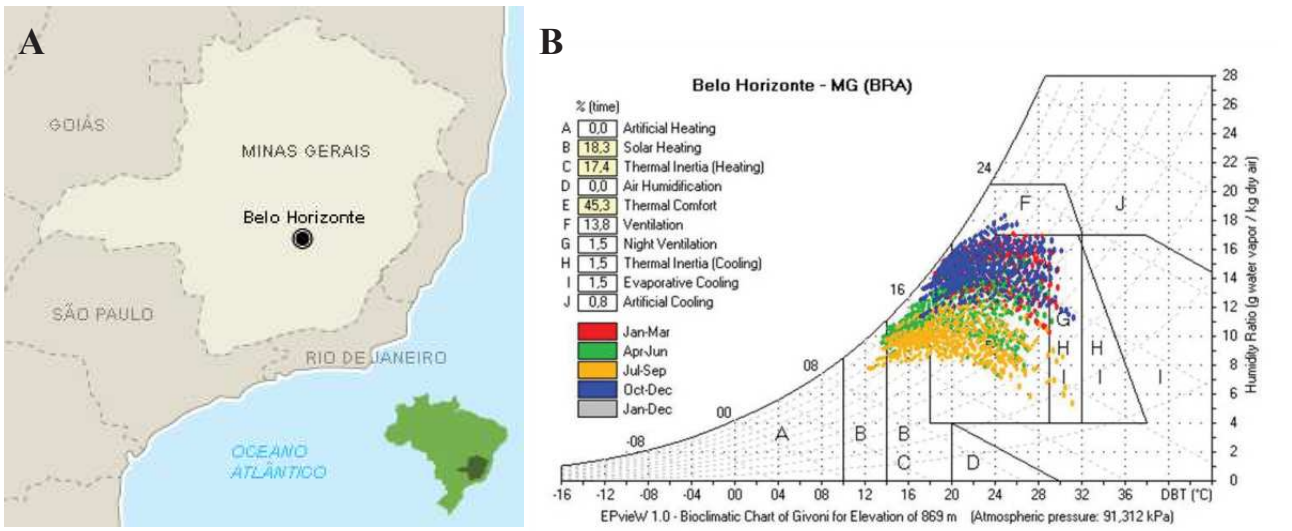

Figura 1 - Localização de Belo Horizonte (A) e dados climáticos da cidade no Diagrama Bioclimático da NBR-15220 (B).

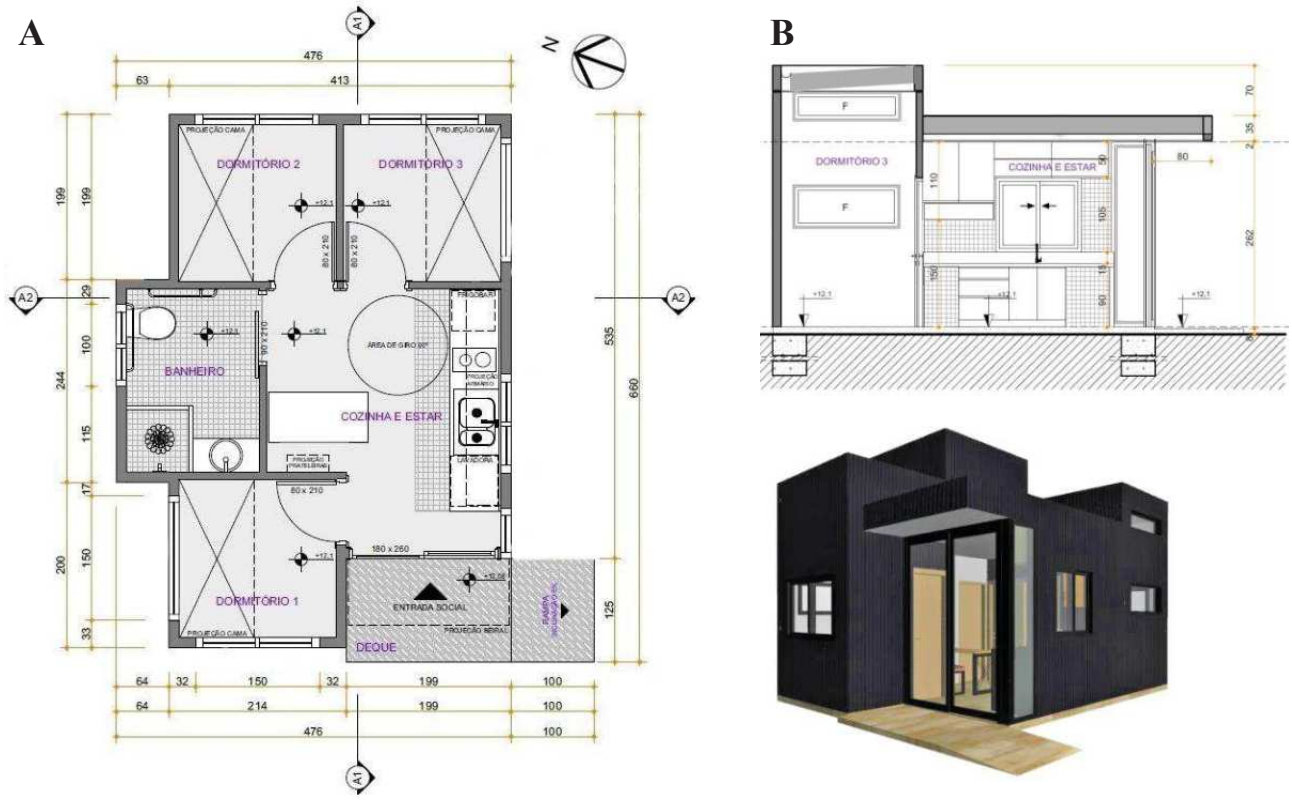

Figura 2 - Planta da moradia (A), corte longitudinal e perspectiva geral (B).

3.2. Procedimentos de cálculo

Foram elaborados 6 cenários de cálculo das aberturas de ventilação da moradia em estudo, considerando os códigos e normas, bem como os citados modelos empíricos. A Tabela 2 mostra o resumo dos cenários elaborados.

Tabela 2 – Cenários para o dimensionamento de aberturas

Cenário	Descrição	Fonte
1	Área de abertura de iluminação e ventilação igual a 1/6 (16,7%) da área de piso do ambiente, em ambientes de permanência prolongada (artigo 60º)	Código de Edificações (Belo Horizonte, 2009)
2	Área de abertura de ventilação igual a 15% (limite inferior) ou 25% (limite superior da área de piso do ambiente (aberturas médias)	NBR-15220 (ABNT, 2005)
3	Renovação de 1 volume/hora (limite inferior) ou 5 volumes/hora (limite superior) em unidades habitacionais avaliadas por simulação computacional (seção 11.5 da norma, parte 1)	NBR-15575 (ABNT, 2013)
4	Recomendação de 34 m^3/h por pessoa e 50 m^3/h por pessoa para apartamentos	Mesquita *et al* (1977)
5	Recomendação de 30 $m^3/(h.m^2)$ e 60 $m^3/(h.m^2)$	BSI (2016)
6	Recomendação de 20 renovações de volume/hora e 40 renovações de volume/hora para habitações em climas tropicais (ambientes em geral das moradias)	Mesquita *et al* (1977); Garde *et al* (1999)

Para facilitar a comparação entre os resultados, foram adotadas as seguintes condições:

- o vento externo de referência foi considerado com velocidade de 1,5 m/s, correspondendo à média anual de Belo Horizonte;
- a área de abertura de entrada foi considerada igual à da abertura de saída; desse modo, cada uma dessas áreas resulta igual à área equivalente ou combinada indicada nos modelos;
- 3 possibilidades de ângulos de incidência de vento com relação à normal à fachada em pressão positiva (ângulo θ): 0º (perpendicular à fachada); 45º (correspondendo à direção predominante de vento incidente nas fachadas de pressão positiva da edificação em estudo) e 60º;
- os coeficientes de pressão de entrada e de saída nos modelos de Irminger e Nokkentued, e de Aynsley foram os mesmos, extraídos e/ou interpolados das fachadas 1 e 2 (opostas), para os já citados ângulos de incidência de vento, do apêndice B.3 de Bittencourt e Cândido (2005), que satisfazem à situação de edificações de pequeno porte (até 3 pavimentos), com entorno de altura equivalente à da edificação. A Tabela 3 traz os coeficientes de pressão adotados.

Tabela 3 – Coeficientes de pressão (Cp) para as aberturas de entrada e saída de ar

Ângulo θ	Cp_1 (entrada de ar)	Cp_2 (saída de ar)
0º	0,20	-0,25
45º	0,05	-0,30
60º	-0,05	-0,28

- no caso do modelo de Van Straaten (esquadria pivotante horizontal), foram consideradas 3 aberturas em série e inclinação da bandeira pivotante de 30º para C_1; área de entorno densamente construída para C_2. Os valores de C_3 foram extraídos e/ou interpolados da tabela do modelo, para os mesmos ângulos de incidência de vento considerados nos outros modelos. A Tabela 4 mostra os coeficientes adotados.

Tabela 4 – Coeficientes de pressão (Cp) para o modelo de Van Straaten

Ângulo θ	C_1	C_2	C_3	$C_3^{0,5}$
0º	0,30	0,33	1,10	1,05
45º	0,30	0,33	0,95	0,97
60º	0,30	0,33	0,75	0,87

Os cálculos foram realizados em planilha eletrônica, permitindo também a construção dos gráficos para as comparações.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 mostra um resumo dos resultados de dimensionamento das aberturas de entrada e saída de ar para ventilação cruzada do caso de estudo, obtidos em cada cenário considerado.

Pode-se observar que, independentemente dos fatores variáveis da ventilação natural, as recomendações do código de edificações e das normas técnicas brasileiras resultam sempre num mesmo dimensionamento de área de abertura, qualquer que seja o tipo de esquadria (cenários 1 e 2). No caso do código de edificações, como não há menção específica para a área de ventilação, assume-se, por experiência prática, que a área para ventilação corresponde à metade da área de abertura calculada, visto que, em geral, as esquadrias especificadas são de correr, com 2 ou 4 folhas.

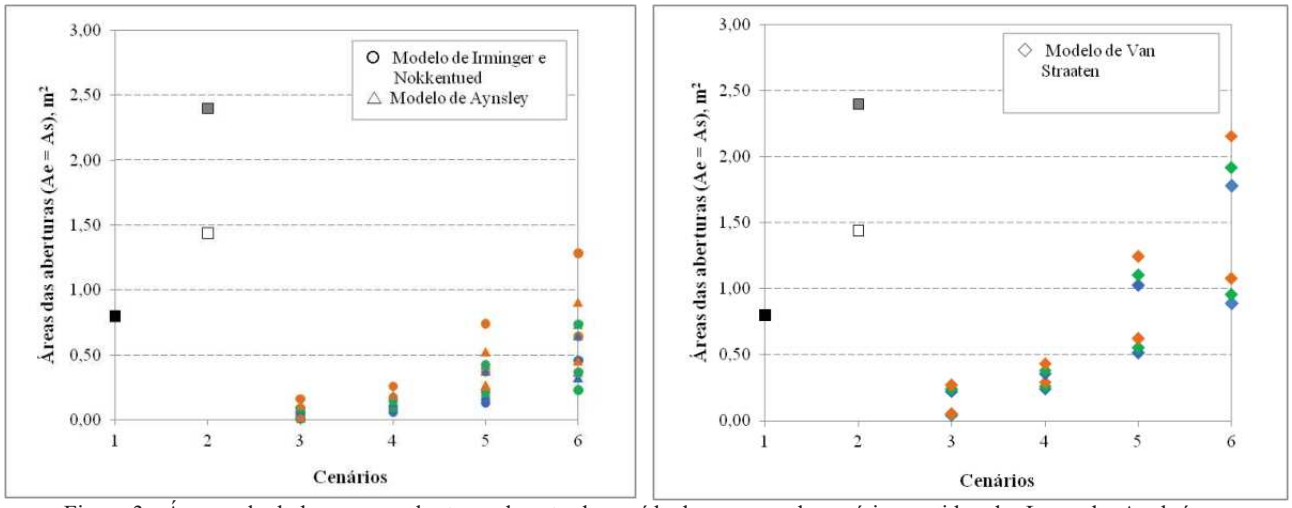

Figura 3 - Áreas calculadas para as aberturas de entrada e saída de ar, em cada cenário considerado. Legenda: Azul: áreas calculadas com ângulo de incidência de vento de 0°; verde: ângulo de 45° e laranja: ângulo de 60°.

Áreas de aberturas extremamente pequenas foram obtidas nos cenários 3 e 4. No caso da aplicação das taxas de renovação de ar previstas para simulação computacional na NBR-15575 (ABNT, 2013), as áreas calculadas pelos modelos empíricos para esquadria de correr ficaram abaixo dos 0,10 m^2 e para esquadria pivotante horizontal, abaixo dos 0,25 m^2. Estes resultados corresponderam aproximadamente às taxas de renovação do ar de 34 m^3/h por pessoa no cenário 4. Com taxas de 50 m^3/h por pessoa chegou-se a áreas de ventilação que variaram de 0,10 m^2 a 0,40 m^2, dependendo do ângulo de incidência do vento, correspondendo em média a 6,7 renovações de volume de ar por hora.

No cenário 5, onde as recomendações do código de edificações indiano foram testadas, as áreas mínimas (para taxa de 30 $m^3.h^{-1}.m^{-2}$) ficaram abaixo de 0,25 m^2 para esquadria de correr e abaixo de 0,60 m^2 para esquadria pivotante horizontal. Para o limite superior de 60 $m^3.h^{-1}.m^{-2}$, as áreas médias foram, respectivamente, de 0,35 m^2 e 0,85 m^2. A taxa de ventilação para o ambiente considerado, em renovações de volume por hora, variou de 11,5 a 23.

Já no cenário 6, as áreas de ventilação foram as maiores, sendo, em média, de 0,70 m^2 nos modelos para esquadria de correr e de 1,46 m^2, ou seja, pouco mais que o dobro do tamanho, para esquadria pivotante horizontal (lembrando, contudo, que a área final de abertura para esquadria de correr deve ser o dobro da área calculada para ventilação). Estas áreas se aproximaram das áreas resultantes do código de edificações e da NBR-15220 (ABNT, 2005).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho partiu da revisão das recomendações para o dimensionamento de aberturas em edificações habitacionais, para comparar tais dimensionamentos obtidos pela aplicação das regras de códigos de edificações, normas técnicas e de modelos empíricos, num caso de habitação mínima em Belo Horizonte.

Observou-se que as recomendações dos vários documentos produzidos em países de clima temperado e frio, muitas delas, inclusive, consideradas referências no Brasil, diferem das recomendações produzidas em países de clima quente, onde a ventilação natural é mais extensamente utilizada. Em países de clima temperado e frio as taxas de renovação do ar são muito baixas, correspondendo apenas à tomada de ar fresco de sistemas mecânicos de ventilação para fins de manutenção das condições higiênicas do ar. Há muito pouca informação na literatura sobre os requisitos de ventilação natural em climas tropicais, além da grande variação nas recomendações, visto que há uma importante diferença entre as necessidades de ventilação em climas quentes e úmidos e em quentes e secos.

Foram elaborados 6 cenários de cálculo das aberturas de ventilação de um ambiente de moradia mínima em Belo Horizonte, considerando as recomendações encontradas e aplicando alguns modelos empíricos mais conhecidos para o cálculo dos fluxos de ar ou das aberturas resultantes destas recomendações. Os resultados obtidos foram muito variados. As recomendações do código de edificações e da NBR-15220 (ABNT, 2005) não consideram os fatores variáveis da ventilação natural, porém permitiram taxas elevadas de renovação de ar com ângulos de incidência do vento de até 60°, desde que não haja muita obstrução no entorno.

A aplicação dos modelos empíricos mostrou que pode haver diferença no dimensionamento das aberturas em função do tipo de esquadria (se de correr ou pivotante horizontal); em geral, obteve-se áreas

maiores com o uso de esquadria pivotante horizontal, o que pode ser explicado pelo fato de que ela produz uma maior obstrução da área de abertura; entretanto, há vantagens em usar este tipo de esquadria em climas tropicais com período chuvoso, pois ela permite manter aberta a área de ventilação. O uso dos modelos empíricos também mostrou, como esperado, que quanto maior o ângulo de incidência do vento na fachada em pressão positiva, maiores têm que ser as áreas de aberturas para manter uma mesma taxa de renovação do ar interior.

As recomendações de taxas vinculadas ao número de ocupantes (cenário 4) geraram áreas de ventilação extremamente pequenas, mostrando que, no caso de habitações mínimas, este tipo de recomendação não deve ser usado. O mesmo ocorreu com as taxas indicadas pela NBR-15575 (ABNT, 2013), no cenário 3. Entretanto, foram taxas dessa ordem (1 a 5 renovações de volume por hora) as encontradas por Amaral e Assis (2019) em simulações computacionais dos ambientes de edificações multifamiliares em entornos urbanos adensados e verticalizados. As recomendações de taxas de 20 a 40 renovações de volume de ar por hora foram as que geraram as maiores áreas de aberturas e mais próximas às áreas resultantes do código de edificações e do nível inferior das recomendações da NBR-15220 (ABNT, 2005) para a zona bioclimática de Belo Horizonte.

Pesquisas mais aprofundadas necessitam ser feitas no Brasil, no sentido de: (a) relacionar as taxas de ventilação com o conforto térmico e o resfriamento interior das habitações; (b) buscar realizar medições em amostras de edificações habitacionais, de modo a gerar informações mais precisas sobre a realidade, nos vários domínios climáticos brasileiros; (c) conhecer melhor as preferências de conforto térmico e ventilação dos moradores, em habitações uni e multifamiliares nas várias regiões do país.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: Edificações Habitacionais: Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

AHMED, T.; KUMAR, P.; MOTTET, L. Natural ventilation in warm climates: the challenges of thermal comfort, heatwave resilience and indoor air quality. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 138, 2021, 17p.

ALLARD, F. (ed.) **Natural Ventilation in Buildings**. A design handbook. London: James & James, 1998.

AMARAL, D. O.; ASSIS, E. S. Impacto da variação de altura de edificações em modelos urbanos teóricos para estudos de ventilação natural em edificações residenciais. **Revista IPT: Tecnologia e Inovação**, v. 2, n. 10, 2019, p. 151-160.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. ANSI/ASHRAE **Standard 62.1** Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Atlanta: ASHRAE, 2019.

ASSIS, E. S.; FERREIRA, C. C. Comparação entre modelos empíricos e computacionais para a estimativa de ventilação em ambientes interiores. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL NUTAU 2006: Inovações Tecnológicas e Sustentabilidade, 2006, São Paulo. *Anais*... (CD-ROM). São Paulo: FAU-USP; Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo, 2006, 10 p.

ATTMA – AIR TIGHTNESS TESTING AND MEASUREMENT ASSOCIATION. **Technical Standard L1**: Measuring air permeability of building envelopes (dwellings). September 2016 Issue. Amersham: ATTMA, 2016.

AUSTRALIA. Australian Building Codes Board. **Building Code of Australia**. Vol 2: Housing provision. Part 3.8.6. Ventilation. Camberra: ABCB, 2010.

BELO HORIZONTE. **Lei No. 9725**, de 15/07/2009: Institui o Código de Edificações do Município de Belo Horizonte e dá Outras Providências. Belo Horizonte: Prefeitura Municipal, 2009.

BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Introdução à Ventilação Natural**. Maceió: EDUFAL, 2005.

BSI – BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS 5925**: Code of practice for ventilation principles and designing for natural ventilation. BSI, 1991.

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

CIBSE – THE CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS. Ventilation and Air Infiltration. In: CIBSE Guide A - **Environmental Design**, 8th Edition, Chapter 4. London: CIBSE, 2015, p. 4-1 to 4-40. Retrieved from: https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0114TDW9/environmental-design/associated-publications

COSTA, Letícia C. **Habitáculo: Projeto de moradia estudantil**. Fundamentação para a disciplina PRJ077- Projeto de Arquitetura e Urbanismo II – Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

DANIEL, L. 'We like to live in the weather': cooling practices in naturally ventilated dwellings in Darwin, Australia. **Energy and Buildings**, v. 158, 2018, p. 549-557.

FERREIRA, D. G.; ASSIS, E. S. A influência da cidade sobre os padrões locais de vento analisada a partir de simulação dinâmica do clima. **Fórum Patrimônio** (on-line), v. 4, n. 2, 2010, 15p.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico**. 5ª ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GARDE, F.; BOYER, H.; CELAIRE, R.; SEAUVE, L. Building design in tropical climates. Elaboration of the ECODOM standard in the French tropical islands. In: ISES 1999 SOLAR WORLD CONGRESS, Jérusalem, Israel, julho de 1999. *Proceedings*... Jérusalem: International Solar Energy Society (ISES), 1999. 8p. Disponível em https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1212/1212.6241.pdf. Acesso em 25/03/2021.

GARDE, F.; MARA, T.; LAURET, A. P.; BOYER, H.; CELAIRE, R. Bringing simulation to implementation: presentation of a global approach in the design of passive solar buildings under humid tropical climates. **Solar Energy**, v. 71, n. 2, p. 109–120, 2001.

INDIA. Bureau of Indian Standards (BIS). **National Building Code**. Vol. 2, Part 8, Section 1: Lighting and Natural Ventilation. 3rd revision, New Delhi: BIS, 2016.

KRÜGER, E.; RIDLEY, I.; LAMBERTS, R. Ventilação natural em uma casa padrão COHAB: avaliação das taxas de ventilação para diferentes tipos de orientação e abertura. V ENCONTRO NACIONAL E II ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1999, Fortaleza. *Anais*.... (CD-ROM). São Paulo: ANTAC/UFCE, 1999. 7p.

LIDDAMENT, M. W. **A Guide to Energy Efficient Ventilation**. Coventry: IEA/AIVC, 1996.

MASCARÓ, L. R. **Energia na Edificação: estratégia para minimizar seu consumo**. [Anexos]. São Paulo: Projeto Editores Associados, 1986.

MESQUITA, A. L. S.; GUIMARÃES, F. A.; NEFUSSI, N. **Engenharia de Ventilação Industrial**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher e CETESB, 1977.

OLIVEIRA, Beatriz; VAZ, J.; PERREIRAS, L.; COSTA, L. C. **Análise de ventilação do projeto e dimensionamento das aberturas**. Disciplina TAU075 - Conforto Térmico e Climatização de Ambientes – Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, setembro de 2020.

REHVA – FEDERATION OF EUROPEAN HEATING, VENTILATION AND AIR-CONDITIONING ASSOCIATIONS. **Health-based ventilation guidelines for Europe**. Work Package 5: Existing buildings, buildings codes, ventilation standards and ventilation in Europe. Final Report. Brussels: REHVA, 2012.

ROCHA, N. A.; SALES, G. L. Estimativa do percentual de redução da velocidade dos ventos em centros urbanos planejados de cidades brasileiras. In: 8º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO PARA O PLANEAMENTO URBANO, REGIONAL, INTEGRADO E SUSTENTÁVEL (PLURIS 2018), 2018, Coimbra, Portugal. *Atas do Congresso*... Coimbra: Dep. Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, 2018, Paper 906.

SACHT, H. M.; LUKIANTCHUKI, M. A.; CARAM, R. M. Análise da influência do tamanho das aberturas de entrada de ar no desempenho da ventilação natural. In: XIV ENCONTRO NACIONAL E X ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2017, Balneário Camboriú. *Anais*... Balneário Camboriú: ANTAC/UNIVALI; Marketing Aumentado, 2017, p. 564-573.

SHAIKH, A. N.; MURALEEDHARAN, T. S.; RAMACHANDRAN, T. V.; SUBBA RAMU, M. C. Estimation of ventilation rates in dwellings. **The Science of the Total Environment**, v. 121, 1992, p. 67-76.

SEKHAR, C.; AKIMOTO, M.; FAN, X. *et al*. Bedroom ventilation: review of existing evidence and current standards. **Building and Environment**, v. 184, 2020, p. 107-229.

TABLADA, A.; TROYER, F.; BLOCKEN, B.; CARMELIET, J.; VERSCHURE, H. On natural ventilation and thermal comfort in compact urban environments - the Old Havana case. **Building and Environment**, v. 44, 2009, p. 1943-1958.

TAVARES, K. Imóveis estão cada vez menores. **O Globo Economia**. Imóveis. 14/04/2013. Disponível em https://oglobo.globo.com/economia/imoveis/imoveis-estao-cada-vez-menores-8109664. Acesso em 30/03/2021.

TOLEDO, A. Critérios para o dimensionamento de aberturas de ventilação natural dos edifícios. In: VI ENCONTRO NACIONAL E III ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2001, São Pedro, SP. *Anais*.... São Paulo: ANTAC, 2001. 8p.

TOLEDO, E. **Ventilação Natural das Habitações**. Maceió: EDUFAL, 1999.

UNITED NATIONS. Dep. Economic and Social Affairs. **Climate and House Design: design of low-cost housing and community facilities**. Vol. 1. New York: UN, 1971.

VILLA, S. B.; SARAMAGO, R. C. P.; CARDOSO, C. C. M.; PAULINO, M. J. A. Habitar vertical: avaliação da qualidade espacial e ambiental de edifícios de apartamentos. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 1, 2018, p. 519-538.

WILTGEN, J. Área média de imóvel novo encolhe 28% com febre de compactos. **Exame Invest**. Minhas Finanças. 28/04/2014. Disponível em https://exame.com/invest/minhas-financas/area-media-de-imovel-novo-encolhe-28-com-febre-de-compactos/. Acesso em 30/03/2021.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem à Pró-Reitoria de Graduação da Universidade Federal de Minas Gerais pela concessão de bolsa de graduação no âmbito do Programa de Monitoria de Graduação (PMG). Agradecemos também ao Prof. Dr. Victor F. Roriz pela permissão de usar o programa EPVieW 1.0, versão beta, para plotar os dados climáticos de Belo Horizonte no diagrama bioclimático de Givoni adaptado, usado pela NBR-15220.