

CONFIGURAÇÃO DE ABERTURAS PARA VENTILAÇÃO NATURAL: contribuições para normas brasileiras baseadas em simulações CFD

CONFIGURACIÓN DE ABERTURAS PARA LA VENTILACIÓN NATURAL: contribuciones a las normas brasileñas basadas en simulaciones cfd

OPENING CONFIGURATION FOR NATURAL VENTILATION: contributions to brazilian standards based on cfd simulations

TIBÚRCIO, ISABELA PASSOS

Doutora em Arquitetura e Urbanismo, Professora na Universidade Federal de Alagoas, e-mail: isabela.tiburcio@ceca.ufal.br

BITTENCOURT, LEONARDO SALAZAR

**PhD em Arquitetura e Urbanismo, Professor Aposentado da Universidade Federal de Alagoas, e-mail: lsb54@hotmail.com*

CANDIDO, CHRISTHINA

Phd em Engenharia Civil/Ciência Ambiental, Professora na The University of Melbour, e-mail: christhina.candido@unimelb.edu.au

RESUMO

A ventilação natural constitui uma das principais estratégias passivas para a obtenção de conforto térmico e para a redução do consumo energético nas edificações, especialmente no contexto das cidades brasileiras, predominantemente inseridas em climas quentes. Apesar de sua importância, observa-se que as normas técnicas brasileiras em vigor apresentam recomendações incompletas, divergentes e, por vezes, insuficientes em relação ao aproveitamento da ventilação natural. Essa lacuna normativa compromete a tomada de decisões projetuais fundamentadas e limita o desempenho das edificações. Diante desse cenário, o presente trabalho teve como objetivo identificar e analisar parâmetros de configuração das aberturas que possam contribuir para o aprimoramento das Normas Brasileiras, a partir da avaliação do comportamento da ventilação natural interna. Para isto foram realizadas análises paramétricas através de simulações computacionais com o software PHOENICS VR 3.6.1 que é um programa CFD – Dinâmica dos Fluidos Computacional. As simulações foram realizadas variando o dimensionamento das aberturas de entrada e saída, a porosidade das portas internas e a orientação em relação aos ângulos de incidência dos ventos. O modelo que apresentou maior frequência de velocidades médias do ar internas mais altas foi o modelo com 25% de área de abertura em relação à área do piso, 100% de porosidade das portas internas e 48% de área de abertura de saída em relação à área de abertura de entrada na unidade habitacional. Os resultados mostraram a forte influência do dimensionamento das aberturas, da porosidade das portas internas e da orientação do edifício no desempenho da ventilação natural.

PALAVRAS-CHAVE: ventilação natural; normas brasileiras, CFD; simulação computacional; aberturas.

RESUMEN

La ventilación natural constituye una de las principales estrategias pasivas para la obtención del confort térmico y la reducción del consumo energético en los edificios, especialmente en el contexto de las ciudades brasileñas, predominantemente ubicadas en climas cálidos. A pesar de su importancia, las normas técnicas brasileñas vigentes presentan recomendaciones incompletas, divergentes y, en algunos casos, insuficientes en relación con el aprovechamiento de la ventilación natural. Esta brecha normativa compromete la toma de decisiones proyectuales fundamentadas y limita el desempeño de los edificios. En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo identificar y analizar parámetros de configuración de las aberturas que puedan contribuir al perfeccionamiento de las normas brasileñas, a partir de la evaluación del comportamiento de la ventilación natural interior. Para ello, se realizaron análisis paramétricos mediante simulaciones computacionales utilizando el software PHOENICS VR 3.6.1, un programa de dinámica de fluidos computacional (CFD). Las simulaciones se llevaron a cabo variando el dimensionamiento de las aberturas de entrada y salida de aire, la porosidad de las puertas interiores y la orientación del edificio en relación con los ángulos de incidencia del viento. El modelo que presentó la mayor frecuencia de velocidades medias internas del aire más elevadas fue aquel con un área de abertura equivalente al 25% del área del piso, 100% de porosidad de las puertas interiores y un área de abertura de salida correspondiente al 48% del área de abertura de entrada en la unidad habitacional. Los resultados demostraron la fuerte influencia del dimensionamiento de las aberturas, de la porosidad de las puertas interiores y de la orientación del edificio en el desempeño de la ventilación natural.

PALABRAS-CLAVES: ventilación natural; normas brasileñas; CFD; simulación computacional; aberturas.

ABSTRACT

Natural ventilation is one of the main passive strategies for achieving thermal comfort and reducing energy consumption in buildings, especially in the context of Brazilian cities, which are predominantly located in hot climates. Despite its importance, current Brazilian technical standards present incomplete, inconsistent, and sometimes insufficient recommendations regarding the use of natural ventilation. This normative gap compromises informed design decision-making and limits building performance. In this context, the present study aimed to identify and analyze opening configuration parameters that may contribute to the improvement of Brazilian standards, based on the evaluation of indoor natural ventilation behavior. To this end, parametric analyses were conducted through computational simulations using the PHOENICS VR 3.6.1 software, a computational fluid dynamics (CFD) program. The simulations were performed by varying the sizing of air inlet and outlet openings, the porosity of internal doors, and the building orientation in relation to wind incidence angles. The model that presented the highest frequency of higher average indoor



REVISTA
PROJETAR

Projeto e Percepção do Ambiente

v.11, n.2, maio de 2026

air velocities was characterized by an opening area equivalent to 25% of the floor area, 100% porosity of internal doors, and an outlet opening area corresponding to 48% of the inlet opening area within the housing unit. The results demonstrated the strong influence of opening dimensions, internal door porosity, and building orientation on natural ventilation performance.

KEYWORDS: natural ventilation; brazilian standards; CFD; computacional simulation; openings.

Recebido em: 01/02/2026

Aceito em: 24/03/2026

1 INTRODUÇÃO

Dentre os aspectos que influenciam as decisões de projeto em arquitetura e urbanismo, as variáveis ambientais se destacam por possibilitarem a produção de espaços mais coerentes com o contexto climático do local onde estão implantados, envolvendo estratégias relacionadas ao conforto ambiental e à eficiência energética nas edificações. Nesse contexto, o uso da ventilação natural nas edificações é uma das estratégias passivas mais importantes para minimizar o efeito de altas temperaturas, em especial em climas tropicais (Koenigsberger, 1974; Givoni, 1962; Santamouris; Wouters, 2006; Aflaki et al, 2015; Fu et al, 2024).

Aflaki et al (2015) apontam a ventilação natural como principal estratégia para edifícios localizados em climas tropicais em comparação com outras técnicas passivas de condicionamento térmico. As temperaturas relativamente constantes ao longo do dia e do ano e os elevados índices de umidade relativa do ar fazem da ventilação natural a estratégia mais presente na arquitetura tropical. Dentre as vantagens do seu uso, destaca-se o seu potencial para reduzir o consumo de energia com aparelhos refrigeradores e ventiladores enquanto proporciona níveis de qualidade do ar interna aceitáveis, além do conforto térmico dos usuários (Alocca et al, 2003; Chen et al, 2017; Fu et al, 2024)

No Brasil, país de clima tropical, a ventilação é uma estratégia recomendada para 99% das cidades, com exceção apenas das cidades que apresentam temperaturas mais baixas. O uso permanente da ventilação cruzada é recomendado para 53,7% do território brasileiro conforme a classificação da NBR 15.220-3 em sua versão publicada em 2005. A ventilação natural é recomendada ainda de forma seletiva nas demais regiões do país. (ABNT, 2005).

Apesar disto, a utilização da ventilação natural tem sido muitas vezes, negligenciada na elaboração de projetos de edificações. O advento da tecnologia dos sistemas de condicionamento artificial, bem como projetos arquitetônicos inadequados à realidade climática local, tem ocasionado a não utilização da ventilação natural em muitas edificações atuais (Lin, Chuah, 2011; Omrani, 2017). O controle das condições térmicas do ambiente, oferecido pela climatização artificial, se torna um atrativo ao seu uso, permitindo ao usuário manter um ambiente interno confortável mesmo que as condições externas não sejam favoráveis (Trindade, Pedrini, Duarte, 2010).

O consumo de energia elétrica tem crescido nos últimos anos em todos os setores da economia brasileira. De toda energia elétrica produzida no país, 51,8% é consumida em edificações, distribuídas entre os setores residencial, comercial e público. Entre estes segmentos, o setor residencial é responsável por 27,5% do consumo de energia, ficando o setor comercial com 16,8% deste consumo. (EPE, 2024).

Em 2009 o Brasil entrou para o grupo de países com normas para eficiência energética de edifícios, com o lançamento do Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética para Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C), publicado pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Metrologia). A exemplo do RTQ-C, entrou em vigor em 2011, o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética para Edificações Residenciais (RTQ-R). Posteriormente, estes documentos se transformaram em Instruções Normativas e estão em vigor até os dias de hoje, sendo de caráter obrigatório para edificações públicas e voluntário para as demais edificações.

O uso da ventilação natural nas edificações está condicionado tanto à disponibilidade de ventos e condições de temperatura do ar, quanto às configurações do edifício, por isso é importante a análise das características climáticas locais e do envelope construído para um melhor aproveitamento deste recurso natural. Os fatores que influenciam o desempenho da ventilação natural em edificações são inúmeros e podem se relacionar de diversas maneiras entre si. Além dos aspectos microclimáticos citados, as características arquitetônicas são determinantes no grau de aproveitamento da ventilação natural do edifício, tais como leiaute e dimensionamento dos ambientes, configuração das aberturas, partições internas, barreiras externas e orientação do edifício em relação aos ventos dominantes.

Dentre estes aspectos, as janelas são muitas vezes a única maneira que o usuário tem de controlar as condições microclimáticas do ambiente interno. Sua disposição, área, localização e tipologia podem influenciar o desempenho da ventilação natural. O tamanho, a forma e a localização das aberturas para

ventilação são os principais aspectos que irão determinar a configuração do fluxo de ar no interior das construções.

A configuração das aberturas e sua influência no desempenho da ventilação natural em edifícios tem sido objeto de diversas pesquisas internacionais (Hassan, et al 2007; Favarolo; Manz, 2005; Lukkunaprasit, et al, 2009; Tantasavasdi, et al, 2001; Yin, et al, 2010; Aktepe, Demir, 2024) e brasileiras (Bittencourt; Lobo, 1999, Toledo, 1999, Verdelho, 2008; Versage, 2009, Cunha, 2010; Sacramento, 2012; Orita, Lukiantchuki, 2025). Apesar disto, as normas no país ainda não contemplam diretrizes consistentes que auxiliem projetistas na tomada de decisões, por exemplo, quanto ao dimensionamento, localização ou tipologia das esquadrias.

A NBR 15.220 (ABNT, 2005) lançava diretrizes para construção de habitações de interesse social como o percentual da área de aberturas em relação à área do piso e recomendações de estratégias bioclimáticas a serem utilizadas em cada região do Brasil. Tais recomendações eram conflitantes com algumas diretrizes da NBR 15.575 (ABNT, 2013) que também versa sobre o desempenho térmico das edificações. Para a mesma Zona Bioclimática as referidas normas recomendavam áreas de aberturas diferentes em 20% em seu dimensionamento, por exemplo, como no caso da antiga Zona Bioclimática 8.

A atual versão da NBR 15.220, no entanto, não traz recomendações de estratégias projetuais (ABNT, 2024), o que dificulta o papel do projetista na busca por espaços que tragam maior adequação ao contexto climático local. Além disto, ambas as NBRs não mencionam questões como a necessidade de abertura de entrada e de saída, tipologia da esquadria, distribuição das aberturas e orientação em relação aos ventos predominantes.

As Instruções Normativas do INMETRO (Brasil, 2022), representam um grande passo para a construção de edifícios mais eficientes energeticamente. Entretanto, ainda apresentam significativas limitações na análise da ventilação natural como estratégia para redução de consumo de energia. Isto ocorre, entre outros fatores, devido às dificuldades que envolvem o estudo do fenômeno da ventilação natural.

Em resumo, apesar da importância da ventilação natural para obtenção de conforto térmico nas edificações, pouco tem sido proposto em termos de normas e regulamentações. As normas em vigor no Brasil apresentam diretrizes que divergem entre si, além de serem aparentemente insuficientes do ponto de vista da ventilação natural.

A definição da configuração das aberturas em edificações residenciais para promoção de conforto térmico e eficiência energética através do aproveitamento da ventilação natural em cidades brasileiras torna-se de fundamental importância, principalmente para buscar informações consistentes que possam embasar decisões projetuais, dada a carência nas atuais normas de desempenho de edificações no Brasil. Por isto, objetivo deste artigo é analisar a ventilação natural interna por ação dos ventos através de simulações com CFD em diferentes configurações de aberturas, a fim de contribuir para reflexões acerca das recomendações feitas nas normas brasileiras.

2 MÉTODO

O método proposto fundamenta-se na análise comparativa de modelos com diferentes configurações, analisando qualitativa e quantitativamente os efeitos de cada parâmetro escolhido, no desempenho da ventilação natural.

As ferramentas CFD (Computer Fluid Dynamics) vêm sendo largamente utilizadas por pesquisadores na análise da ventilação natural. Sua aplicação permite controlar todas as variáveis envolvidas na questão investigada, se apresentando como uma ferramenta indicada para a realização de análises paramétricas e permitindo a identificação dos efeitos produzidos por cada um dos parâmetros examinados (Hooff; Blocken, 2013; Trindade, et al, 2010; Bittencourt, 1993).

Por este motivo, optou-se por utilizar uma ferramenta CFD para a análise do impacto produzido por diferentes configurações de aberturas no comportamento da ventilação natural em edificações residenciais multifamiliares. O software escolhido foi o PHOENICS, produzido pela CHAM na sua versão 3.6.1.

Os procedimentos metodológicos utilizados foram divididos em cinco etapas:

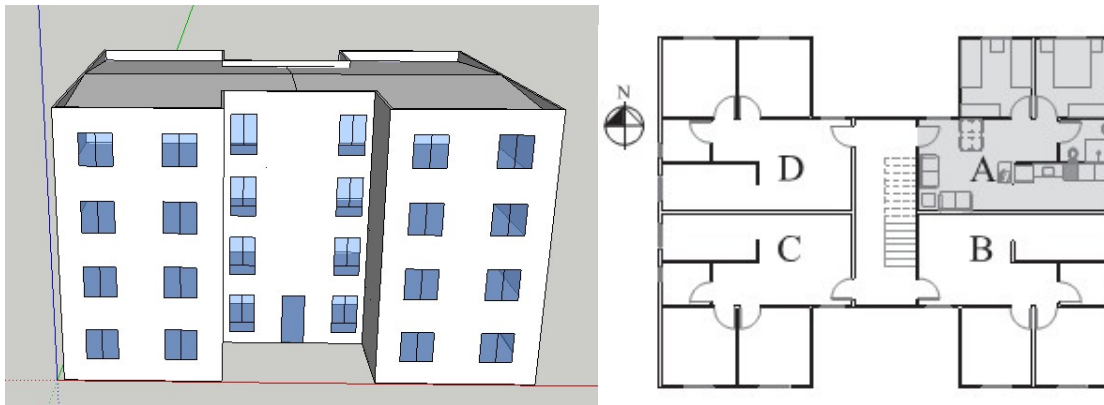
- Definição e caracterização do modelo;
- Definição dos parâmetros a serem simulados;
- Configuração dos dados de simulação;
- Simulações computacionais;
- Análise dos resultados.

Definição e caracterização do modelo

Devido a sua representatividade nas cidades brasileiras, bem como a possibilidade de analisar diferentes configurações de aberturas, foi escolhida a tipologia de apartamento típico para faixa de renda 1 em formato H apresentada no estudo de Triana et al (2015). Esta tipologia de quatro apartamentos por andar é bastante praticada nas cidades brasileiras tanto em habitações populares quanto em edificações voltadas para a classe média, sofrendo algumas adaptações de acordo com o público alvo de cada empreendimento, como por exemplo, o acréscimo de um quarto e o aumento da área útil dos ambientes.

Os modelos foram construídos detalhando apenas o térreo e o terceiro pavimento, transformando os outros pavimentos em blocos sem aberturas de modo a agilizar as simulações. Além dos pavimentos intermediários, o corredor também foi considerado um bloco fechado, já que a porta de acesso aos apartamentos geralmente fica fechada por questões de segurança. Da mesma forma, tanto as NBRs quanto o Regulamento de Eficiência Energética não consideram a porta principal como uma abertura de entrada de ar.

Figura 1: Modelo escolhido para análise: volumetria e planta baixa do pavimento tipo.



Fonte: Triana, 2015.

Segundo Triana (2015) a edificação típica escolhida para este estudo possui as seguintes características: área de serviço integrada com a cozinha, sala de estar/jantar integradas (além disto, não existem paredes ou portas que dividam a sala de estar/jantar e a cozinha/área de serviço, portanto, serão considerados como um único ambiente), paredes de painel de concreto de 10cm com transmitância de $4,4W/m^2K$ e capacidade térmica de $240kJ/m^2K$. Coberta em telha de fibrocimento e laje de concreto com 10cm de espessura, transmitância de $2,06W/m^2K$ e capacidade térmica de $233kJ/m^2K$. As janelas dos quartos são compostas por duas folhas de correr com área do vão de $1,44m^2$ e fator de ventilação de 0,45. A sala possui uma janela com duas folhas de correr e uma peça de vidro fixa na parte inferior da janela, totalizando vão de $1,60m^2$ e fator de ventilação de 0,375. A cozinha possui uma janela de $1,20m^2$ com duas folhas de correr e fator de ventilação de 0,45. E o banheiro uma janela de $0,36m^2$ tipo “boca de lobo”

Definição dos parâmetros a serem simulados

Dentre os aspectos relacionados à abertura que afetam o desempenho da ventilação natural, foram escolhidos para análise: a área efetiva de aberturas externas, a relação entre área de abertura de entrada e área de abertura de saída na unidade habitacional e a porosidade das portas internas (ventilação cruzada). Os motivos serão listados a seguir:

- Esses parâmetros têm influência direta e significativa no desempenho da ventilação natural nas edificações;
- Geralmente, são características definidas por arquitetos durante o processo projetual. Sendo assim, se o arquiteto tiver informações precisas sobre como configurar melhor as aberturas, de forma a obter um melhor desempenho da ventilação natural, pode assim fazê-lo.
- O dimensionamento das aberturas está presente nas recomendações das principais normas de desempenho de edificações e regulamentos, sendo a única variável presente nas Normas Brasileiras (ABNT, 2005, 2013, 2024) como forma de recomendação quantitativa para ventilação natural (dada pela relação entre área de abertura x área do piso do ambiente), conforme visto anteriormente. Como este trabalho visa contribuir para estas Normas, tais parâmetros foram escolhidos para análise.

Com relação ao dimensionamento das aberturas foram simulados os seguintes percentuais de área de abertura com relação à área do piso: 8%, 12%, 25% e 40%. Esses percentuais foram escolhidos por estarem presentes na versão antiga da NBR 15.220 e na NBR 15.575. As relações entre área de abertura de entrada/área de abertura de saída de cada modelo foram calculadas em função das áreas de abertura dimensionadas.

Quadro 1: Proporção entre aberturas de saída e entrada do vento em cada caso analisado.

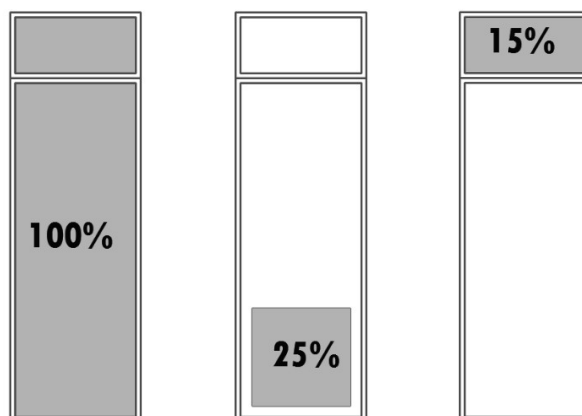
Casos	Área de Abertura / Área do Piso	Área de Saída / Área de Entrada
1	8	50
2	12	31
3	25	48
4	40	36

Fonte: Autores.

Além da relação entre áreas de aberturas de entrada e saída, a ventilação cruzada depende também da existência de aberturas entre os ambientes, garantindo o escoamento do ar em toda unidade habitacional.

Portanto, para analisar a ventilação cruzada no modelo, serão simulados três tipos de porosidade das portas internas dos ambientes quarto 1, quarto 2 e banheiro (a cozinha não possui porta no projeto original e foi mantida aberta em todas as simulações). As porosidades das portas internas consideradas foram: 100% de porosidade, considerando uma situação de porta aberta com bandeira aberta, 25% de porosidade considerando uma situação de venezianas na parte inferior da porta, e 15% de porosidade considerando uma bandeira aberta (Figura 02).

Figura 2: Diferentes porosidades da porta de acesso aos ambientes, onde a parte hachurada em cinza corresponde à área considerada vazada nas simulações.



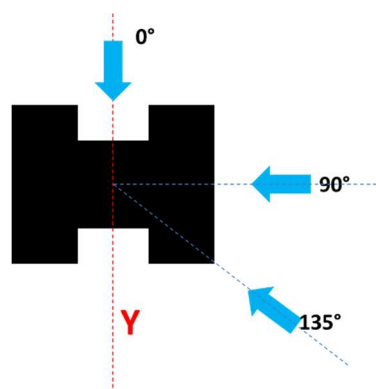
Fonte: Autores.

Quanto à incidência dos ventos, como os apartamentos são iguais, apenas rebatidos em planta, foram analisados três ângulos de incidências do vento em relação ao edifício, a fim de verificar a influência da orientação das aberturas em relação aos ventos predominantes em qualquer região onde ele esteja implantado, no desempenho da ventilação natural.

As incidências analisadas foram: incidência 1 igual a 0°, a incidência 2 igual a 90°, a incidência 3 igual a 135° em relação ao eixo Y no domínio do programa (localização do Norte), cobrindo assim, todos os ângulos de

incidência de 45° em 45° graus para o modelo analisado, considerando que os apartamentos possuem planta espelhada (Figura 03).

Figura 3: ângulos de incidência dos ventos simulados.



Fonte: Autores.

Para a escolha das velocidades médias do vento a serem simuladas, foram observadas as velocidades médias mensais do vento nas capitais brasileiras, considerando que estas se localizam em realidades climáticas distintas. Foram calculadas as velocidades médias anuais, e observou-se que a média da velocidade entre as cidades é de 2m/s, sendo este também o valor mais frequente. A mediana foi calculada e obteve-se como resultado o valor de 1,93m/s. Por este motivo, as simulações foram realizadas utilizando a velocidade de entrada de 2m/s.

Configuração dos dados de simulação

O PHOENICS é um software desenvolvido pela empresa britânica CHAM, e foi o primeiro código computacional baseado na dinâmica dos fluidos computadorizada (CFD) a surgir no mercado. O programa se utiliza do cálculo através de elementos finitos para resolver as equações diferenciais da dinâmica dos fluidos e desde o seu lançamento em 1981, vem sendo utilizado por arquitetos, construtores, engenheiros, indústrias e em pesquisas acadêmicas (CHAM, 2005). O nome PHOENICS é um acrônimo para Parabolic Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code Series (CHAM, 2005); o software é bastante flexível, permitindo simular diversas situações incluindo "(...) escoamento multifásico, transferência de calor, processos com reações químicas, acompanhamento de partículas, dispersão de fumaça, aerodinâmica, análise de eficiência de equipamentos, climatização e ventilação, entre outros" (Safe Solutions, 2012).

A velocidade a ser considerada nas simulações será de 2m/s, entretanto é necessário que se faça uma correção deste valor para a altura da abertura que se deseja estudar, já que esses dados geralmente são coletados em estações meteorológicas, localizadas em áreas abertas, cujos anemômetros são posicionados a uma altura padrão de 10 metros. A não observação dessa correção é provavelmente uma das fontes de erro mais comuns no cálculo das taxas de renovação de ar (Bittencourt; Candido, 2008).

Existem diversos modelos de correção para ajustar a velocidade do vento à altura da abertura, com base nas características de rugosidade e adensamento do entorno, variando de campos abertos a regiões centrais em grandes cidades. Optou-se por simular a condição de rugosidade menos favorável à ventilação natural (centro de cidade). Neste caso, utilizando os valores: $k=0,21$ e $a=0,33$, demonstrados no Quadro 2.

Quadro 2: Coeficientes de rugosidade de terreno adotados nas simulações.

COEFICIENTES DE RUGOSIDADE DO TERRENO		
Terreno	K	a
Área aberta plana	0,68	0,17
Campo com obstáculos esparsos	0,52	0,20
Área suburbana	0,35	0,25
Centro de cidade	0,21	0,33

Fonte: Jackman, 1980, apud Bittencourt; Candido, 2008.

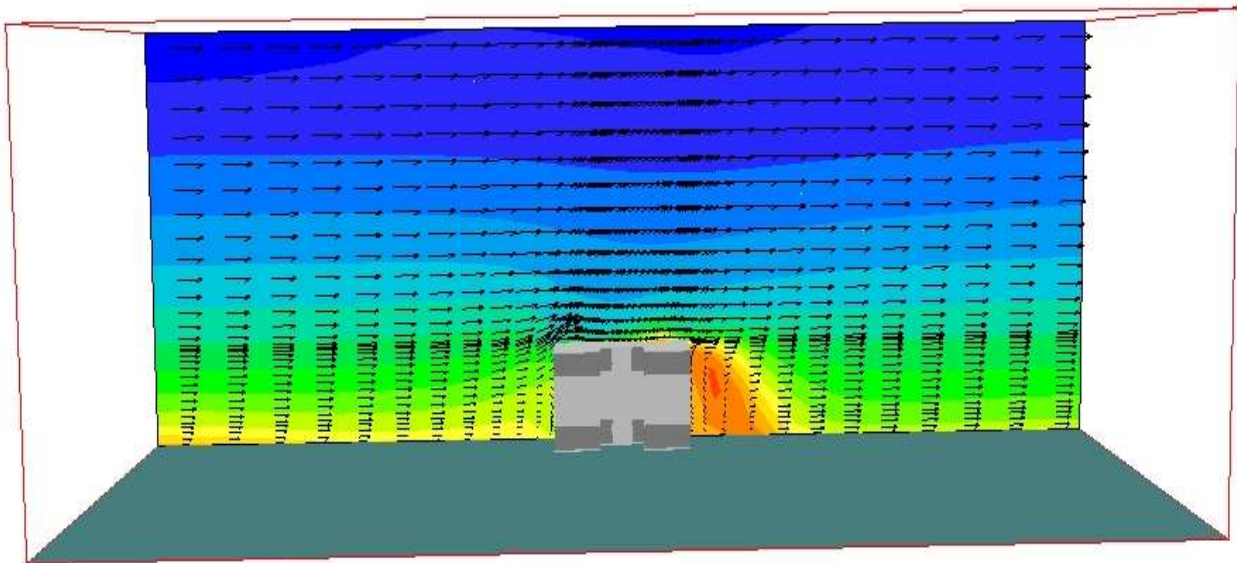
Estes coeficientes foram utilizados no cálculo da altura de referência (reference height=113,21m), através da equação (BRE, 1978): $V_z = V_{10} \times K \times Z_a$, onde:

- V_z é a velocidade do vento na altura Z de interesse (m/s);
- V_{10} é a velocidade do vento a 10 metros de altura (m/s);
- Z é a altura da cumeeira para edificações de até dois andares ou a altura da janela para edificações mais altas (m);
- K e a são função da localização da edificação e podem ser obtidos por tabelas.

Além disto, o valor do coeficiente $a = 0,33$ também foi usado no campo Power Law index do software, determinando assim a configuração do gradiente de vento no programa.

Foi utilizado o objeto WIND disponível nesta versão do Programa. O Wind é criado como um objeto cujos atributos podem ser configurados, tais como velocidade a uma altura de referência e a direção (Figura 04). Neste caso, não é preciso definir áreas de entrada e saída de ar no domínio (*inlet* e *outlet*), nem calcular o gradiente de vento para cada altura, o próprio programa realiza os cálculos a partir das configurações do WIND.

Figura 4: Gradiente de vento determinado no programa por meio da configuração do objeto WIND.



Fonte: Autores

Em um ambiente CFD, domínio é o espaço no qual o modelo será inserido e simulado. Deve ter um tamanho que permita o livre escoamento do fluxo de modo a não ocasionar interferências nos campos de pressão gerados nas simulações (Sacramento, 2012). Para esta investigação, as dimensões do domínio foram calculadas segundo as orientações do suporte técnico do software para utilização do módulo WIND.

Foram utilizadas as seguintes equações na definição dos limites do domínio:

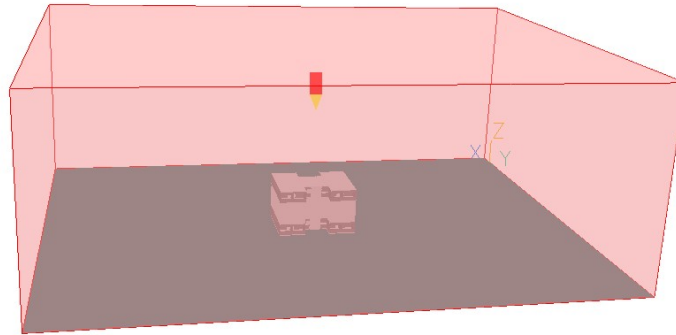
$$X_{dom} = 3 \cdot X_{obj} + X_{obj} + 3 \cdot X_{obj}$$

$$Y_{dom} = 3 \cdot Y_{obj} + Y_{obj} + 3 \cdot Y_{obj}$$

$$Z_{dom} = 3 \cdot Z_{obj} + Z_{obj}$$

Sendo assim, as dimensões do objeto (edifício) foram calculadas no Sketch Up obtendo-se os seguintes valores: $x=17,62m$, $y=13,6m$ e $z=11,15m$. Aplicando-se os valores nas fórmulas, obtiveram-se os seguintes resultados: $X_{dom}=123,34m$, $Y_{dom}=95,20m$, $Z_{dom}=44,60m$.

Figura 5: Domínio calculado, representado pelo WIND, com o modelo ao centro.

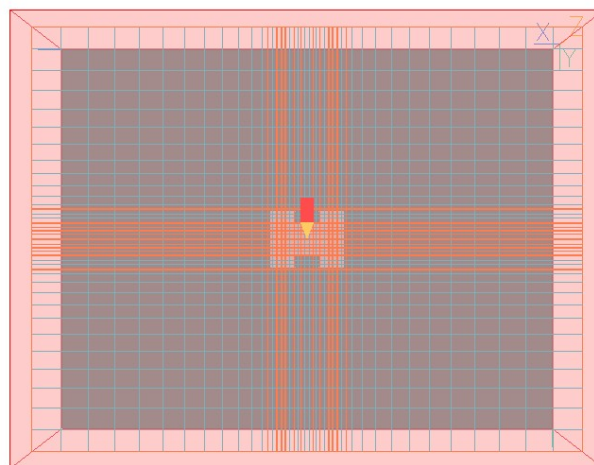


Fonte: Autores.

A malha é a subdivisão do domínio em um conjunto de volumes elementares nos quais o modelo numérico resolverá as equações básicas. A divisão do espaço é realizada através de um algoritmo computacional específico em cada software. É importante verificar se a malha resultante deste processo possui volumes elementares homogêneos, pois o resultado final da simulação depende da qualidade da malha (CUMPLIDO NETO et al, 2011). No caso do PHOENICS, a malha ou grid pode ser configurada de três formas: cartesiana, cilíndrico-polar ou body-fitted (BFC). Como o modelo em análise possui forma ortogonal, adotou-se a malha cartesiana para este trabalho.

Inicialmente, uma malha preliminar é definida pelo próprio software com base na geometria do objeto. A partir desta malha criada pelo programa é necessário refinar os pontos onde se deseja conhecer detalhadamente o fluxo do vento, para que nestes pontos os resultados sejam mais precisos. Após vários testes, a malha resultante é exibida nas imagens a seguir (Figura 06).

Figura 6: Malha configurada no software PHOENICS para o modelo em Planta Baixa.

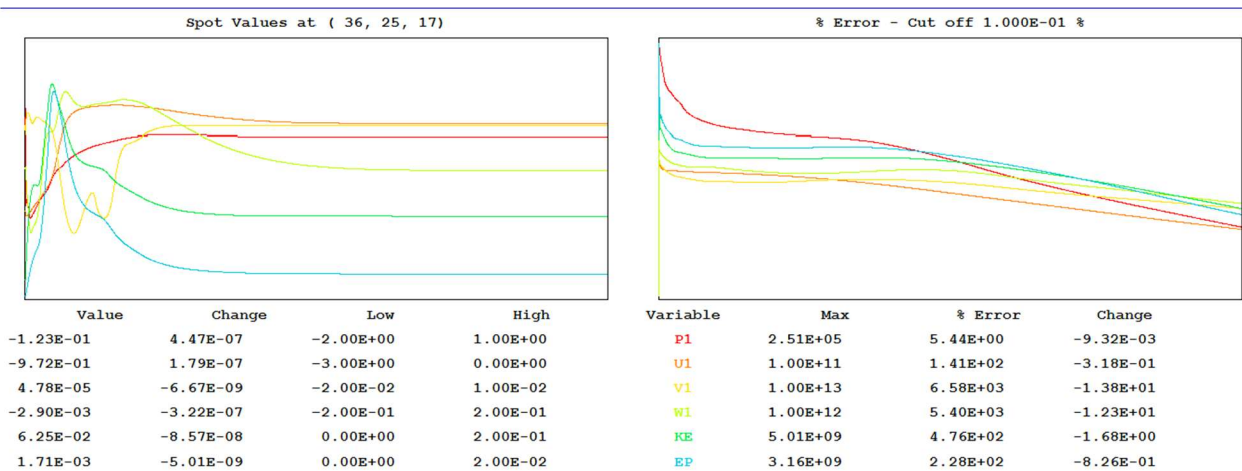


Fonte: Autores.

A relaxação é uma técnica que o programa utiliza para diminuir as possíveis taxas excessivas de oscilação dos resultados. Isso não afeta a solução final. Em muitos casos, a convergência será muito difícil de obter sem configurações de relaxamento adequadas, por isto é muito importante que elas sejam configuradas corretamente. Foram utilizados os seguintes parâmetros de relaxamento: $P1=0.1$; $U1=V1=W1=0.0155$; $KE=0.1$; $EP=0.1$, onde P = pressão, U = velocidade em X , V = velocidade em Y , W = velocidade em Z , KE = energia cinética turbulenta, EP = dissipação da energia cinética, seguindo instruções do suporte técnico para as condições de simulação deste trabalho. O algoritmo computacional do software resolve as equações governantes a partir do método dos elementos finitos. Como critério de convergência dos resultados, foi inserido um erro médio de 10^{-4} . O modelo de turbulência utilizado foi o $k-\epsilon$, que é mais comumente utilizado neste tipo de simulação. A Figura 7 a seguir, mostra a curva de erros da simulação do modelo com 25% de área de abertura em relação à área de piso e vento a 90° . É possível observar que o erro converge de forma

estável (sem grandes oscilações) para o valor adotado pelo critério de erro e os valores das variáveis calculadas no Spot Values ficam constantes no decorrer dos cálculos.

Figura 7: Gráfico de erros e spot values da simulação do modelo com 25% de área de abertura em relação à área de piso e incidência do vento a 90°.



Fonte: Autores.

Modo de análise dos resultados

Para análise quantitativa, foram extraídas as médias da velocidade do ar em cada ambiente de cada apartamento nos dois pavimentos investigados. Foram coletadas as velocidades do ar em duas alturas: 0,6m acima do piso dos pavimentos, que seria a altura de um usuário sentado ou deitado e 1,5m acima do piso dos pavimentos que seria a zona mediana de respiração do ser humano (MORAIS, 2013). Este procedimento foi feito em cada ambiente de cada modelo, e os dados foram registrados em uma planilha Excel para posterior análise, elaborando-se tabelas e gráficos.

Destaca-se que nos modelos configurados com porosidade das portas internas igual a 25%, a abertura foi localizada na parte inferior das portas e por isso a verificação das velocidades internas a 0,6m do chão foi utilizada também para verificar se houve algum incremento na velocidade do ar nestes modelos.

Outra análise essencial para verificar o desempenho da ventilação natural, é a análise qualitativa do fluxo de ar, observando se ele atinge os usuários dos espaços. Portanto, foram extraídas imagens que possibilitaram a análise qualitativa do fluxo de ar no interior do edifício, em cada modelo simulado. As imagens foram extraídas a altura de 0,6m e 1,5m do piso no térreo e 3º pavimento, assim como a obtenção dos valores de velocidade média.

É importante destacar que a escala de velocidade utilizada foi de 0,0 a 1,5m/s, pois foi essa faixa de velocidade mais frequentemente encontrada em todos os modelos simulados. Apenas em um dos modelos, com 40% de área de abertura em relação à área do piso, 100% de porosidade das portas e vento incidente a 135° que esses valores foram ultrapassados em alguns ambientes. Mas para efeito de comparação a escala de valores foi mantida. Outro detalhe na visualização dos resultados, é que as cores tradicionais do programa foram invertidas para ter uma melhor relação com os resultados de velocidade do ar sendo os valores mais baixos com cores mais quentes e os valores mais altos de velocidade do ar representados com cores mais frias nas imagens.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

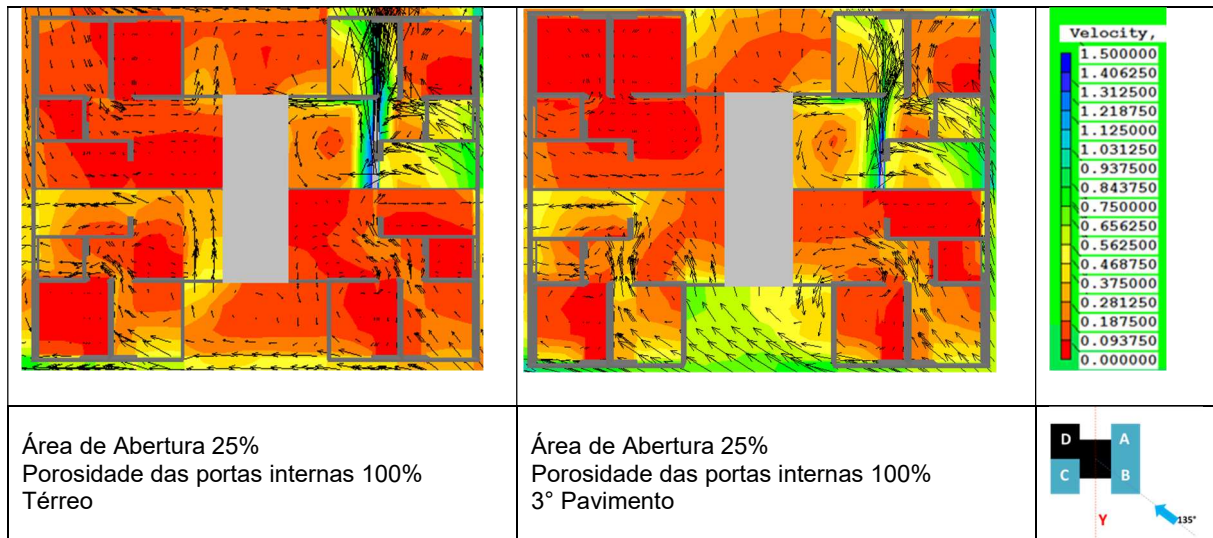
Análise qualitativa

A análise qualitativa das simulações evidenciou que a orientação do edifício em relação aos ventos dominantes na região modifica significativamente o fluxo do vento no interior da edificação.

Em relação aos ambientes mais favorecidos em cada incidência de vento, observou-se que para incidência de 0° as maiores velocidades foram encontradas na cozinha. Com o vento a 90° os ambientes que obtiveram maiores velocidade do ar foram a cozinha e a sala. E para o vento incidindo a 135° os ambientes mais

favorecidos foram quarto 1 e sala. Isto ocorreu devido ao posicionamento dos ambientes em relação aos ventos simulados neste tipo de edifício.

Figura 8: Distribuição do fluxo de ar nos modelos com 25% de área de abertura em relação à área de piso: térreo e 3º pavimento. Incidência do vento 135°.

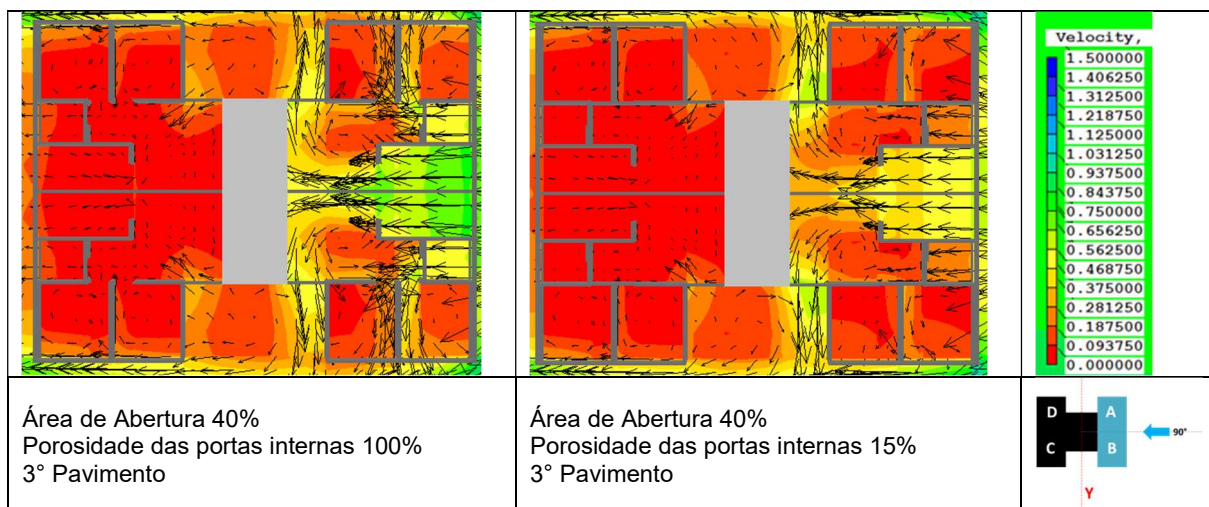


Fonte: Autores.

Em uma análise geral, considera-se que a orientação em relação ao vento incidente a 135° é favorável em relação às demais orientações, em edifícios de forma quadrada e com plantas rebatidas como no caso analisado. Isto porque os valores de velocidade do ar alcançados são maiores e a distribuição do fluxo de ar não é tão heterogênea entre os apartamentos como nos outros casos. Observou-se também que o formato “H” do edifício e as aberturas das salas dos quatro apartamentos posicionadas na reentrância favoreceram a ventilação natural na maioria dos apartamentos, devido à diferença de pressão gerada nesta incidência.

Quanto à porosidade das portas internas, mais uma vez fica evidente a importância desta variável no desempenho da ventilação natural, tanto para que o ar se distribua de maneira mais uniforme pelos ambientes como acontece no modelo com 40% de área de abertura e 100% de porosidade das portas internas, quanto para que velocidades mais altas sejam alcançadas e assim a ventilação possa proporcionar melhores condições de conforto térmico aos usuários.

Figura 9: Distribuição do fluxo de ar nos modelos com 40% de área de abertura em relação à área de piso, variando a porosidade das portas internas. Incidência do vento 90°.



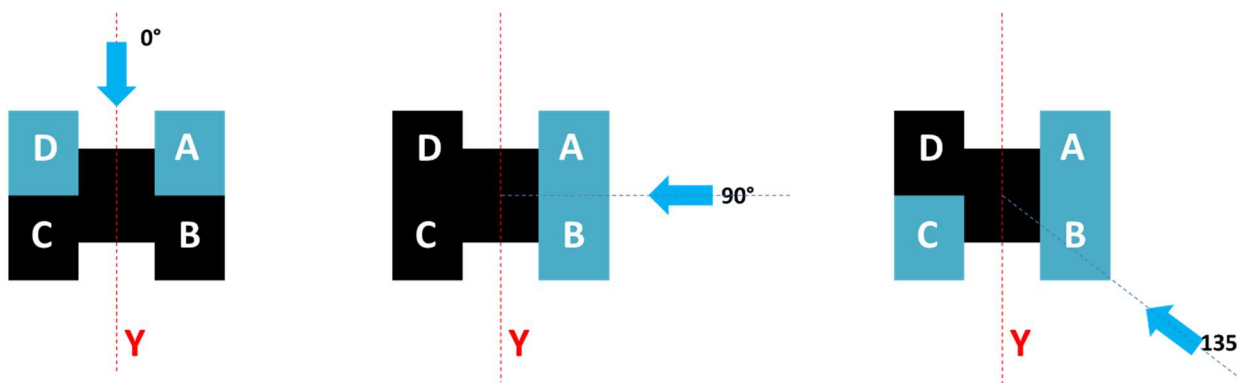
Fonte: Autores.

Análise quantitativa

Quanto à incidência de ventos

De maneira geral, os valores de velocidade média do ar nos ambientes foram mais altos nos modelos com maior área de abertura e também nos modelos com maior porosidade das portas internas. Nas simulações com incidência de vento a 0° os apartamentos A e D ficam a barlavento, nas simulações com vento a 90° os apartamentos a barlavento foram o A e o B enquanto nas simulações com o vento incidindo a 135°, os apartamentos A, B e C ficam em posição favorável (Figura 10). Desta forma, utilizou-se para fins comparativos, os dados do apartamento A, já que nas três incidências os dados mais altos de velocidade do vento foram encontrados neste apartamento.

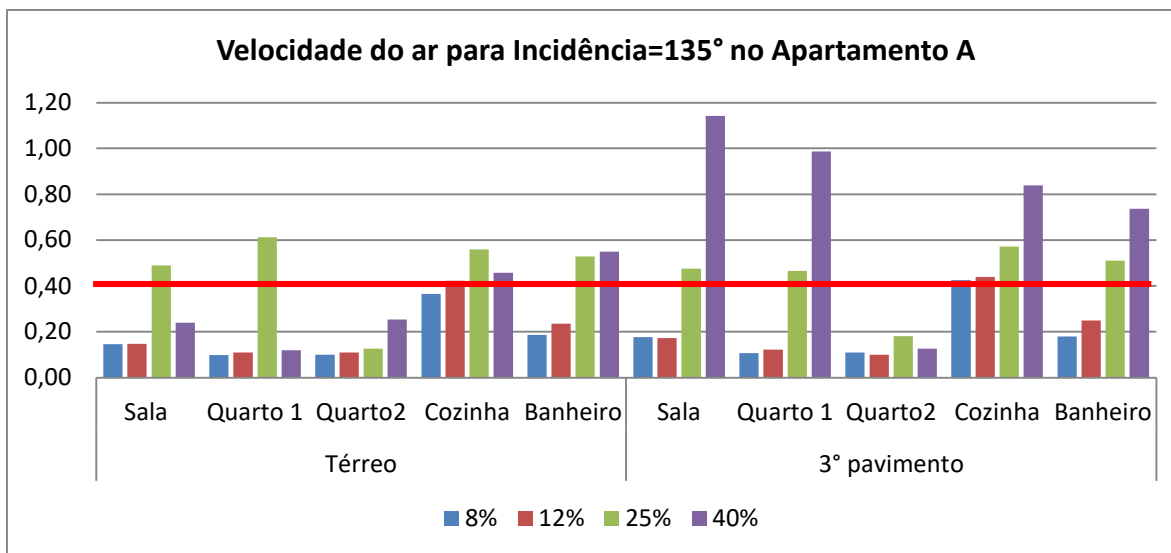
Figura 10: Incidências de vento analisadas e os apartamentos privilegiados em cada caso.



Fonte: Autores.

Nas simulações com incidência de vento a 135°, os valores foram os mais altos dentre as três incidências simuladas, mantendo-se entre 0,10 m/s e 1,14m/s. Os valores mais altos foram encontrados nos modelos com 40% da área de abertura em relação a área de piso, principalmente nos ambientes sala, quarto 1, cozinha e banheiro do terceiro pavimento (Figura 11).

Figura 11: Valores de velocidade do ar para os modelos com incidência do vento a 135° no Apartamento A, por ambiente.



Fonte: Autores.

Observa-se que no têrreo, entretanto, o modelo com 25% de área de abertura em relação à área do piso apresentou maiores velocidades do ar internas na sala, quarto 1 e cozinha. Isto pode ter ocorrido porque o percentual de área de abertura de entrada em relação ao percentual de área de saída é maior neste modelo, ou seja, ele possui maior potencial de ventilação cruzada do que o modelo com áreas de abertura iguais a

40% das áreas de piso. Observa-se, portanto, que a dimensão das aberturas não pode ser considerada isoladamente, mas outros fatores podem ser determinantes no desempenho da ventilação natural.

Por fim, é importante destacar que os percentuais propostos pelas Normas, sempre em relação à área do piso dos ambientes nem sempre são praticáveis, pois muitas vezes, são maiores que a área de parede do ambiente disponível na fachada. Isto ocorreu na sala e no banheiro do modelo analisado, onde, não foi possível abrir uma janela na dimensão recomendada, nos casos de 25% e 40% em relação à área de piso. Nestes casos, as janelas foram dimensionadas considerando a largura máxima proporcionada pela fachada disponível, e mantendo-se a altura da janela padrão do modelo, de 1,0m. Os percentuais obtidos, relacionando-se às áreas das aberturas resultantes pelas áreas de piso e de fachada de cada ambiente são listados a seguir (Quadro 03).

Quadro 03: Percentuais de área de abertura em relação ao piso e à fachada dos ambientes.

Ambiente	Área de Abertura / Área de piso	Área de abertura / Área de fachada
Quarto 1 (m ²)	8%	10%
	12%	14%
	25%	30%
	40%	48%
Quarto 2 (m ²)	8%	10%
	12%	14%
	25%	30%
	40%	48%
Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	8%	21%
	12%	10%
	25%	26%
	40%	26%
Banheiro (m ²)	8%	9%
	12%	19%
	25%	19%
	40%	24%

Fonte: Autores.

Nota-se, portanto, que seria mais adequado se as Normas trabalhassem com o percentual da área de abertura em relação à área de fachada do ambiente, evitando este tipo de problema. Esta relação inclusive já é utilizada em diversos estudos para investigar o desempenho térmico de edifícios e, em pesquisas internacionais, recebe a sigla WWR (*Window Wall Ratio*), que já foi abordada por diversos autores, como, entre outros Al-Tamimi et al (2011).

Quanto a relação entre área de abertura e área de piso

Ventilação cruzada é aquela proporcionada pela existência de aberturas dispostas em diferentes fachadas de uma mesma unidade habitacional, sejam elas opostas ou adjacentes, de modo a proporcionar escoamento do ar através das aberturas que interligam os ambientes desta UH.

As áreas de abertura de entrada e as áreas de abertura de saída de cada Unidade Habitacional do modelo foram agrupadas a fim de definir estes percentuais. Os modelos com 8% de área de abertura em relação à área de piso possuem 50%, os modelos com 12% de área de abertura em relação à área de piso possuem 31%, os modelos com 25% de área de abertura em relação à área de piso possuem 48% e por fim, os modelos com 40% possuem 36% (Quadro 04).

Quadro 04: Percentuais obtidos na relação entre área de aberturas de entrada e saída nas unidades habitacionais dos modelos simulados.

Área de abertura/ Área do Piso	Área de entrada/ Área de saída
8%	50%
12%	31%
25%	48%
40%	36%

Fonte: Autores.

Apesar disto, os resultados mostraram que o percentual de ventilação cruzada por si só não é capaz de garantir a velocidade de ar necessária para promover o conforto térmico dos usuários. Nos modelos onde esse percentual era mais alto, mas as áreas de abertura eram menores os valores de velocidade do ar interna foram baixos, em muitos casos menores que 0,4m/s.

Por outro lado, o modelo que obteve mais frequência de velocidades acima de 0,4m/s foi o modelo com 25% de abertura em relação à área do piso e 48% de ventilação cruzada, mostrando que área de aberturas maiores combinadas à existência de aberturas de entrada e saída podem surtir um bom resultado no conforto térmico dos usuários.

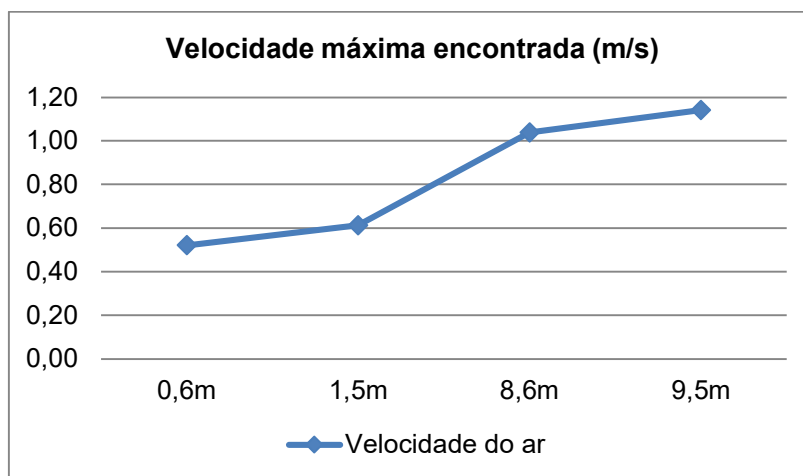
Quanto a porosidade das portas internas

De maneira geral, e como era de se esperar, os melhores resultados tanto em relação à velocidade do ar nos ambientes internos quanto em relação à distribuição do fluxo de ar ocorreram nos modelos com a porosidade das portas de 100%, ou seja, com a porta e a bandeira totalmente abertas. Entretanto, sabe-se que muitas vezes, por questões de privacidade, as portas dos ambientes são fechadas principalmente durante a noite.

A fim de investigar a influência da porosidade das portas, a velocidade do ar foi analisada em duas alturas: a 0,6m do chão e a 1,5m do chão, no primeiro e no terceiro pavimento do modelo. A 0,6m do chão o maior valor de velocidade média do ar encontrado foi de 0,52m/s e ocorreu no modelo com 25% de área de abertura em relação a área de piso dos ambientes e com porosidade das portas internas de 100%. A 1,5m de altura do chão, o maior valor de velocidade ocorreu no mesmo modelo com 25% de área de abertura e 100% de porosidade das portas internas. O valor foi de 0,61m/s. Tanto a 0,6m quanto a 1,5m do chão os valores mais altos de velocidade encontrados foram registrados no quarto 1.

No terceiro pavimento, a 8,6m do chão, o maior valor encontrado foi de 1,04m/s e ocorreu no modelo configurado com 40% de área de abertura em relação às áreas de piso dos ambientes e porosidade das portas internas de 100%. O mesmo ocorreu a altura de 9,5m do chão, só que o valor encontrado foi um pouco mais alto, de 1,14m/s. Tanto a 8,6m quanto a 9,5m do chão os valores mais altos de velocidade encontrados foram registrados na sala (Figura 12). Esta análise mostra que a velocidade média do ar também ocorre em função da altura das aberturas na edificação.

Figura 12: Valores de velocidade máxima encontrados nas alturas investigadas.



Fonte: Autores.

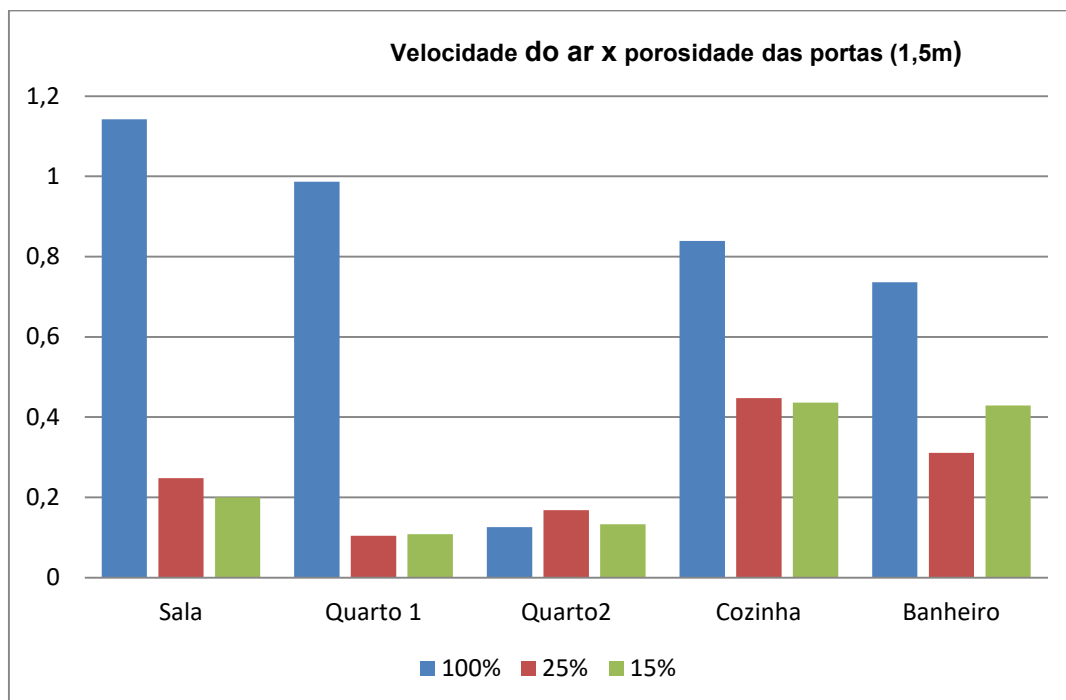
Todos os valores máximos foram encontrados em modelos simulados com o vento a 135°, que foi a incidência que proporcionou velocidades de ar mais altas, e no apartamento C, que devido a orientação e à forma do edifício é o mais favorável em relação aos ventos neste caso.

Com o vento incidindo a 0° os valores mais altos de velocidade do ar foram obtidos a altura de 9,5m do chão, na cozinha dos apartamentos A e D, no modelo com 40% de área de abertura e 100% de porosidade das portas internas. O valor máximo obtido nesta incidência foi de 0,35m/s. Nas simulações com o vento a 90°, o valor mais alto de velocidade do ar foi de 0,66m/s, obtido a altura de 9,5m do chão, na cozinha dos apartamentos A e B, também no modelo com 40% de área de abertura e 100% de porosidade das portas internas.

Por fim, foram comparadas as velocidades do ar nos ambientes internos dos modelos com 40% de área de abertura em relação à área de piso, para incidência de 135°, no terceiro pavimento, que representam o melhor caso em relação aos valores de velocidade do ar obtidos.

Aqueles com 100% de porosidade das portas internas obtiveram velocidades do ar mais altas em todos os ambientes exceto no quarto 2, onde as velocidades dos três modelos foram bem próximas, de aproximadamente 0,2m/s. Isto ocorreu a altura de 1,5m do piso (Figura 13).

Figura 13: Gráfico de velocidades do ar para os três tipos de porosidade das portas a 1,5m do chão.

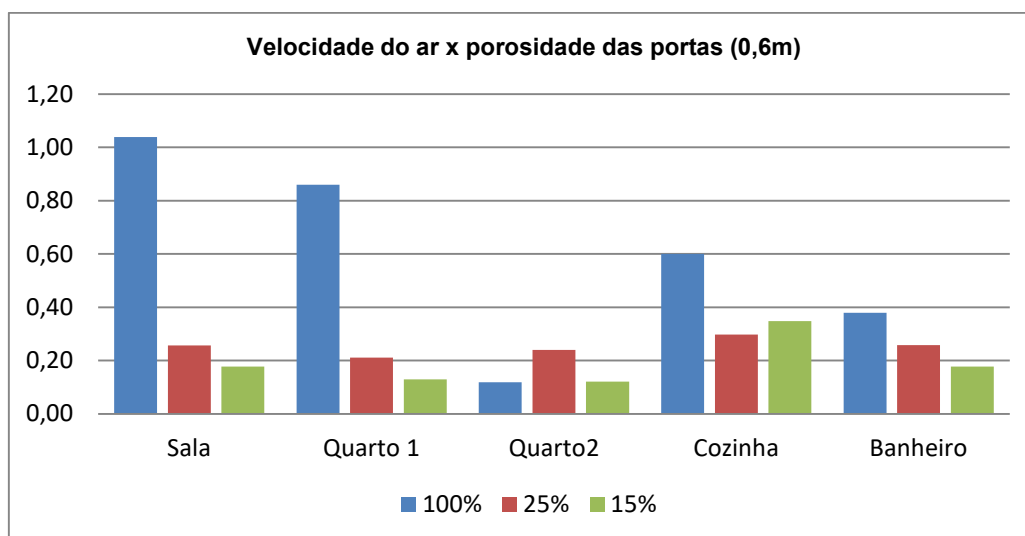


Fonte: Autores.

Observando o percurso do vento neste caso, verificou-se que ele entra pela janela da sala que fica na reentrância do edifício e a porta do quarto 1 quando aberta gera uma diferença de pressão que faz com que o ar penetre em alta velocidade no quarto 1, deixando o quarto 2 com velocidades bem mais baixas. Por esta razão, as velocidades obtidas nos modelos com 25% e 15% de porosidade das portas internas foram mais altas neste ambiente.

O mesmo ocorre a 0,6m do piso, neste mesmo modelo com porosidade das portas internas de 100%, onde a velocidade do ar foi mais alta no quarto 1 do que no quarto 2, só que a esta altura, o modelo com porosidade interna da porta de 25% apresentou velocidade mais alta, de 0,24m/s (Figura 14).

Figura 14: Gráfico de velocidades do ar para os três tipos de porosidade das portas a 0,6m do chão.



Fonte: Autores.

Este foi o único caso em que se verificou aumento da velocidade do ar na altura de 0,6m do piso no modelo em que a porosidade das portas foi igual a 25%, em relação aos modelos com 100% de porosidade das portas internas. A análise em diferentes alturas em relação ao piso mostrou que na maioria dos casos os maiores valores foram verificados a 1,5m do chão. Isto confirma a necessidade de prover elementos que contribuam com a ventilação natural na altura do usuário sentado, como peitoris ventilados, por exemplo, principalmente em ambientes como quartos e salas, para que o vento seja capaz de promover o resfriamento fisiológico dos usuários.

4. REFLEXÕES E CONTRIBUIÇÕES PARA AS NORMAS

Confirmou-se através dos resultados, que a configuração das aberturas é uma característica fundamental para o desempenho da ventilação natural nas edificações. Ficou claro também que o bom desempenho da ventilação natural não depende apenas de uma característica isolada, como o dimensionamento das aberturas, por exemplo, mas da associação de características como dimensionamento, disposição de áreas de abertura e de saída do vento e porosidade das portas internas, investigadas neste trabalho, que exercem forte influência sobre a ventilação no interior dos edifícios.

Tais características, combinadas com outras que não foram objeto de estudo, mas que também são importantes para o desempenho da ventilação natural, tais como: tipologia da esquadria, formato da abertura e principalmente a localização das aberturas, devem ser cuidadosamente definidas pelo projetista para que a ventilação natural possa ser utilizada como estratégia de projeto.

Conforme discutido anteriormente, as Normas atuais não colaboram para que estas decisões sejam tomadas da maneira mais acertada, pois trazem recomendações pontuais, geralmente indicando apenas o dimensionamento das aberturas, ainda assim, de maneira confusa.

Dimensionamento de aberturas

Verificou-se nas simulações que os maiores valores de velocidade do ar foram obtidos nos modelos com 40% de área de abertura em relação à área de piso, o que equivaleria a 48% da área de fachada do ambiente no caso do modelo adotado neste trabalho. Entretanto, o modelo que obteve uma maior frequência de velocidades acima de 0,4m/s foi aquele com 25% de área de abertura em relação às áreas de piso, que equivale a 30% da área de fachada no caso dos quartos do modelo adotado.

Considerando que é mais viável utilizar percentuais de dimensionamento em relação à fachada dos ambientes do que do piso, recomenda-se adotar no mínimo 30% de área de abertura em relação à área de fachada dos ambientes de permanência prolongada, como quartos, salas e cozinhas, para cidades de climas quentes e levemente quentes, onde a ventilação natural é a principal estratégia para obter conforto térmico.

Nas demais cidades com climas considerados frios e mistos, recomenda-se no mínimo 20% de área de abertura em relação à área de fachada dos ambientes de permanência prolongada, desde que as esquadrias

sejam passíveis de fechamento e controle por parte dos usuários. Isto porque, mesmo em regiões de clima mais ameno, ou com grandes variações sazonais de temperatura, há estações quentes nas quais a ventilação cruzada é recomendada. Então, para que seja possível o uso da ventilação natural, capaz de promover o resfriamento fisiológico dos usuários sempre que necessário, recomenda-se este dimensionamento em ambientes de permanência prolongada. Para os dias frios ou outras situações em que, nessas cidades o vento fosse indesejável, o usuário poderia controlar o uso das esquadrias e ainda assim se sentir confortável.

Para os ambientes de permanência transitória, tais como área de serviço e banheiros, recomenda-se o mínimo de 10% de área de abertura em relação à área de fachada dos ambientes em todas as zonas bioclimáticas. Este percentual equivale a um pouco mais do que os 8% em relação à área do piso, que foi simulado e em cujos casos verificou-se velocidades internas muito baixas. Considera-se que aberturas menores do que as simuladas poderiam comprometer as condições de higiene e salubridade dos ambientes a depender da incidência dos ventos e do clima da região.

Ventilação cruzada

Confirmou-se neste trabalho a importância da existência de aberturas de entrada e saída para que ocorra a ventilação cruzada não só na unidade habitacional como um todo, mas principalmente no ambiente em si. As simulações considerando apenas as bandeiras das portas internas abertas tiveram velocidades abaixo de 0,4m/s em quase todos os modelos simulados exceto nos modelos com 40% de área de abertura em relação à área de piso a incidência de 90° e 135°, onde esta frequência foi de 3% e 2% respectivamente.

Sendo assim, recomenda-se o uso de dispositivos que permitam o escoamento do ar entre os ambientes tais como venezianas, seteiras e bandeiras que podem ser agregados às portas dos ambientes e que sejam passíveis de fechamento para garantir privacidade quando necessário. Esses dispositivos podem ainda favorecer a ventilação na porção mais baixa do ambiente, permitindo a passagem do vento na altura do usuário sentado ou deitado, aproximadamente 0,6m do chão.

Quando for possível, projetar mais de uma abertura no mesmo ambiente em fachadas adjacentes ou opostas será importante para permitir a ventilação cruzada; principalmente em ambientes de permanência prolongada.

Além disto, verificou-se que as velocidades mais altas foram obtidas nos modelos que além de possuírem maiores aberturas, possuíam também maiores percentuais na relação entre área de aberturas de saída/área de aberturas de entrada. Os percentuais eram de 36% e 48% nos modelos com maiores áreas de aberturas, considerando a unidade habitacional. Por esta razão, recomenda-se adotar uma proporção de ventilação cruzada de no mínimo 35% em cada unidade habitacional, relacionando as aberturas de entrada e as aberturas de saída dispostas em fachadas diferentes do edifício.

Quanto a incidência dos ventos

Sabe-se que as normas atuais não trazem nenhuma recomendação quanto à posição das aberturas em relação aos ventos dominantes. Entretanto, este foi um fator determinante na obtenção de maiores velocidades do ar no interior dos ambientes dos modelos simulados. Os melhores resultados tanto em termos de distribuição do ar quanto em termos de velocidade do ar, foram obtidos, conforme visto anteriormente, nos modelos com incidência de vento a 135° em relação ao eixo Y (Norte na Planta baixa da Figura 03). Por esta razão recomenda-se:

- Posicionar as aberturas de entrada dos ambientes de permanência prolongada para a incidência de ventos predominante na região, observando o entorno e os possíveis obstáculos que o mesmo possa proporcionar ao vento antes de atingir o edifício.
- Priorizar a incidência de vento a 45°, 135°, 225° e 315° sempre que possível como vento de entrada nos ambientes de permanência prolongada, principalmente nas cidades de clima quente.

5 CONCLUSÕES

Quanto ao dimensionamento das aberturas, o modelo que apresentou maior frequência de velocidades médias internas acima de 0,4m/s foi o modelo com 25% de área de abertura em relação à área do piso, 100% de porosidade das portas internas e 48% de razão entre aberturas de entrada e saída nas unidades habitacionais. Esse resultado demonstra que a relação entre áreas de entrada e áreas de saída do ar é tão importante quanto o dimensionamento das aberturas de entrada.

Ainda no que se refere à ventilação cruzada, ficou clara nas simulações a influência das portas internas no desempenho da ventilação natural na edificação, pois é através delas que a ventilação se desloca de um ambiente para o outro. Os valores de velocidade do ar obtidos nos modelos com 100% de porosidade das portas foram sempre superiores aos encontrados nos modelos com 25% e 15% de porosidade.

A análise conjunta de diversos parâmetros que afetam a ventilação natural nas edificações mostrou, de maneira geral, que as recomendações das normativas são falhas, não considerando a integração entre os diversos aspectos que influenciam o desempenho da ventilação natural nos edifícios.

Além do dimensionamento das aberturas de entrada e saída em edificações residenciais para fins de ventilação natural, este artigo ressalta a importância da porosidade das portas internas das unidades habitacionais, aspecto ausente das atuais normas vigentes no Brasil e muitas vezes desconsiderado por projetistas. Como em edificações residenciais multifamiliares existem, muitas vezes, ambientes com apenas uma janela que funciona como abertura de entrada, as portas assumem papel fundamental, pois funcionam como aberturas de saída. Uma vez que essas portas permanecem fechadas a maior parte do tempo, torná-las porosas possibilita a ventilação cruzada no ambiente mesmo quando as portas estiverem fechadas.

Outro aspecto importante no desempenho da ventilação natural é a relação entre área de aberturas de entrada e área de aberturas de saída em uma unidade habitacional. As maiores velocidades do ar em ambientes internos foram obtidas nos modelos com a associação destes dois aspectos: maiores dimensões de aberturas e maiores percentuais na relação entre área de abertura de entrada e área de aberturas de saída na unidade habitacional. Por esta razão recomenda-se o percentual mínimo de 35% que é um valor mais próximo aos simulados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- AFLAKI, A. N.; MAHYUDDIN, Z. A.; AWAD, C. M. BAHARUM, M. R., A review on natural ventilation applications through building facade components and ventilation openings in tropical climates. **Energy and Buildings**. Accepted manuscript. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.033>>. Acesso em 01 jan. 2026.
- AKTEPE, B.; DEMIR, H. Impact of Window Opening Shapes on Wind-Driven Cross Ventilation Performance in a Generic Isolated Building: A Simulation Study. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: **Tasarım Ve Teknoloji**, v.12, n.3, 2024, 758-768. Disponível em : <<https://doi.org/10.29109/gujsc.1524553>>. Acesso em 19 jan. 2026.
- ALLOCCA, C.; CHEN, Y.; GLICKSMAN, L. R. Design analysis of single-sided natural ventilation. **Energy and Buildings**. V. 35, pp. 785 – 795, 2003. Disponível em : < [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00239-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00239-6)> Acesso em 23 nov. 2025.
- AL-TAMIMI, N. A. M., FADZIL, S. F. S.; HARUN, W. M. W. The Effects of Orientation, Ventilation, and Varied WWR on the Thermal Performance of Residential Rooms in the Tropics. **Journal of Sustainable Development**.. v.4, n.2, 2011, pp. 142-149. Disponível em < <https://www.ccsenet.org/journal/index.php/jsd/article/view/8580>> Acesso em 17 abr. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15.220**. Desempenho térmico para habitações de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15.575**. Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (ABNT). **NBR 15220-3**. Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- BITTENCOURT, L. S.; CÂNDIDO, C. M. **Introdução à ventilação natural**. 3. ed. Maceió: EDUFAL, 2008.
- BITTENCOURT, L. S.; LÔBO, D. G. F. A influência da localização das aberturas na ventilação natural de edificações escolares. In: V ENCONTRO NACIONAL/ II ENCONTRO de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...**Fortaleza/CE,1999.
- BITTENCOURT, Leonardo S. **Ventilation as a Cooling Resource for Warm Humid Climates**: an investigation on the influence of geometric aspects of perforated block walls to improve ventilation inside low-rise buildings. 1993. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Architectural Association Graduate School, Londres, 1993.
- BRASIL. MINISTÉRIO DA ECONOMIA. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Portaria nº 309, de 6 de setembro de 2022**. Aprova a Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas – INI-C e a Instrução Normativa de Eficiência Energética para Edificações Residenciais - INI-R. Brasília, 2022.
- BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT (BRE). Principles of Natural Ventilation. **BRE Digest**, n. 210. BRE, Garston, 1978.
- CHAM. **Practical CFD for designer engineers** : From the pioneer of CFD. 2005.

- CHEN, Q. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. **Building and Environment**, v. 44, n.4, 2009, pp.848-858. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.025>.> Acesso em 4 nov. 2025.
- CUMPLIDO NETO, R. H.; TIBIRIÇA, A. M. B.; TIBIRIÇA, A. C. G.; CAMPOS, J. C. C. Um roteiro para simulação CFD de ventilação natural por ação dos ventos em edificações. In: XI ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais.....** Búzios, RJ. 2011.
- CUNHA, L. J. B. F. **Análise de métodos para aplicação da ventilação natural em projetos de edificações em Natal-RN**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2010.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional 2024**. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>.> Acesso em: 16 fev. 2025.
- FAVAROLO, P. A., MANZ, H. Temperature-driven single sided ventilation through a large rectangular opening. **Building and Environment**. 2005; v. 40, n.5, pp. 689-99. Disponível em < <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.08.003>.> Acesso em 20 jan. 2026.
- FU, X.; TAI, V. C.; MOEY, L. K.; RAHMAN, N. F. A.; KAMARUL., A. A.; BAGLEE, D. Opening configurations and natural cross ventilation performance in a double-loaded multi-level apartment building: A CFD analysis. In: **Building and Environment**, v. 254, April,2024, 111404. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132324002464?via%3Dihub> > Acesso em 20 de jan. 2026.
- GIVONI, B. **Basic study of ventilation problems in houses in hot countries**. Israel: Building Research Station of the Institute of Technology, 1962.
- HASSAN, M. A.; GUIRGUIS, N. M.; SHAALAN, M. R.; EL-SHAZLYN, K. M. Investigation of effects of window combinations on ventilation characteristics for thermal comfort in buildings. **Desalination**, v.209, n.1-3; 2007, pp. 251-60. Disponível em : <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916407001269>>. Acesso em 05 dez. 2025.
- HOOFF; T.V. BLOCKEN, B. CFD evaluation of natural ventilation of indoor environments by the concentration decay method: CO2 gas dispersion from a semi-enclosed stadium. **Building and Environment**. v. 61. p.1-17, 2013. Disponível em < <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.021>> Acesso em 7 jan. 2026.
- KOENIGSBERGER, O.; INGERSOL, T. G.; MAYTHEW, A.; SZOKOLAY, S. V. **Manual of Tropical Housing and Building**. Part I: Climatic Design. Londres: Longman, 1974
- LIN J.T., CHUAH Y.K. A study on the potential of natural ventilation and cooling for large spaces in subtropical climatic regions. **Building and Environment**.; v. 46.; 2011, pp.89–97. Disponível em < <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.07.007>.> Acesso em 12 jan. 2026.
- LUKKUNAPRASIT, P, RUANGRASSAMEE, A. THANANISATHIT, N. Tsunami loading on buildings with openings. **Science of Tsunami Hazards**, v.28, n. 5,: 2009; pp. 303-10.
- MORAIS, J. M. **Ventilação natural em edifícios multifamiliares do “Programa Minha Casa Minha Vida”**. Tese (Doutorado). Programa de pós-graduação em Arquitetura, Tecnologia e Cidade. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual De Campinas. Campinas, 2013.
- OMRANI, S. GARCIA-HANSEN, V., CAPRA, B. R., DROGEMULLER, R. Effect of natural ventilation mode on thermal comfort and ventilation performance: Full-scale measurement. **Energy and Buildings**, V. 156, 2017, pp. 1-16, ISSN 0378-7788. Disponível em < <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.061>.> Acesso em 25 out. 2025.
- ORITA, B. M.; LUKIANTCHUKI, M..A. Análise do desempenho de diferentes configurações de aberturas na ventilação natural em enfermarias coletivas: ensaios na mesa d'água. In: 18º ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais [...].[S. l.]**, 2025. DOI: 10.46421/encacelacac.v18i1.6671. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/6671>. Acesso em: 20 jan. 2026.
- SACRAMENTO, A. **A influência da dimensão da abertura de saída da cozinha/serviço no potencial de ventilação dos ambientes de edificações multifamiliares em Maceió-AL**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2012.
- SAFE. SOLUTIONS. SOFTWARES: **PHOENICS**. 2012. Disponível em: <<http://www.safesolutions.com.br/pt/software/phoenics>> Acesso em: 12 ago. 2015.
- SANTAMOURIS, M.; WOUTERS, P. **Building ventilation**: the state of the art. James andJames, 2006.
- TANTASAVASDI, C., SREBIC, J., CHEN, Q. Natural ventilation design for houses in Thailand. **Energy and Buildings**.; v. 33, n.8, 2001, pp. 815-24. Disponível em < [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00073-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00073-1).> Acesso em 3 jan. 2026.
- TOLEDO, A. M. Inadequação entre geometria e desempenho, nos índices para dimensionamento de vãos e aberturas para ventilação natural, a partir da área de piso. In: V ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO / II ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais do** Fortaleza: ENCAC, 1999.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. **Energy policy**. v. 87, 2015, pp. 524-541. Disponível em < <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.08.041>.> Acesso em 3 jan. 2026.

TRINDADE, S. C. PEDRINI, A. DUARTE, R. N. C. Métodos de aplicação da simulação computacional em edifícios naturalmente ventilados no clima quente e úmido. **Ambiente construído**. (Online) v.10 n..4 Porto Alegre Oct./Dec. 2010. Disponível em < <https://doi.org/10.1590/S1678-86212010000400004>> Acesso em 03 fev. 2025.

VERDELHO, S. I. C. **Avaliação do potencial de arrefecimento de edifícios através da ventilação natural**. Dissertação (Mestrado). Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2008.

VERSAGE, R. de S. **Ventilação natural e desempenho térmico em edifícios verticais multifamiliares em Campo Grande, MS**. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. Centro Tecnológico Universidade Federal de Santa Catarina. 2009.

YIN, W., ZHANG, G., YANG, W., WANG, X. Natural ventilation potential model considering solution multiplicity, window opening percentage, air velocity and humidity in China. **Building and Environment**.; v.45, n.2, 2010, pp. 338-344. Disponível em < <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.012>> Acesso em 2 jan. 2026.

NOTA DO EDITOR (*): O conteúdo do artigo e as imagens nele publicadas são de responsabilidade dos autores.