

Efeitos da incorporação de muros no comportamento da ventilação natural em habitações populares térreas

Impacts of boundary walls on natural ventilation behavior in low-cost single-story residential buildings

Isabely Penina Cavalcanti da Costa 

Lucila Chebel Labaki 

Athos Lages 

Resumo

A ventilação natural é uma importante estratégia de resfriamento passivo das edificações em climas tropicais. Entretanto, o aproveitamento desse recurso pode ser prejudicado por anteparos presentes no entorno das edificações, tais como os muros. Contudo, escassos estudos se dedicaram a quantificar a influência desses elementos no comportamento dos ventos. O objetivo dessa pesquisa foi investigar os efeitos da incorporação de muros nas condições de ventilação natural em habitações populares térreas. Com a utilização de simulações CFD (*Computational Fluid Dynamics*), foram analisados quatro cenários: (1) edificação sem fechamento do lote; (2) com fechamento parcial; (3) com fechamento total e muro frontal sólido; e (4) com fechamento total e muro frontal vazado. Os resultados indicaram que a incorporação dos muros agravou as condições de ventilação existentes na edificação. O pior cenário para o aproveitamento dos ventos foi o fechamento total do lote com muros sólidos. A substituição de muros frontais sólidos por muros com componentes vazados gerou um incremento de 42% nos valores de velocidade do vento dentro da edificação. Assim, destaca-se que a inclusão de elementos vazados pode aliar a necessidade de delimitação do lote com menores impactos nas condições de ventilação natural.

Palavras-chave: Ventilação natural. Habitações térreas. Muro. CFD.

Abstract

Natural ventilation is an important passive cooling strategy in regions of tropical climate. However, bulkheads present in the surroundings of buildings, such as boundary walls, can compromise the effectiveness of this resource. Few studies have focused on quantifying the influence of these elements on wind behavior. Thus, this study aimed to assess the impacts of boundary walls on natural ventilation in low-cost single-story residential buildings. Four scenarios were explored employing computational fluid dynamics (CFD): (1) buildings without boundary walls; (2) buildings with partial boundary walls; (3) buildings with total closure and solid front wall; and (4) buildings with total closure and air passages in the front wall. The results showed that the incorporation of boundary walls in the buildings worsened the existing ventilation conditions. The worst scenario for wind exploitation was total closure with solid front walls. The replacement of solid front walls with walls with air passages increased wind speed inside the building by 42%. Thus, the inclusion of air passages can combine the need to delimit the land with a lower impact on natural ventilation conditions.

Keywords: *Natural ventilation. Single-story residential buildings. Boundary wall. Computational fluid dynamics.*

^{1,2}Isabely Penina Cavalcanti da Costa

¹Universidade Estadual de Campinas
Campinas - SP - Brasil

²Instituto Federal de Alagoas
Maceió - AL - Brasil

³Lucila Chebel Labaki

³Universidade Estadual de Campinas
Campinas - SP - Brasil

⁴Athos Lages

⁴Experts Inovação e Tecnologia
Jaboatão dos Guararapes - PE - Brasil

Recebido em 15/09/22

Aceito em 13/12/22

Introdução

Além da preocupação ambiental e energética, a crise de saúde ocasionada pela pandemia do Coronavírus (Covid-19) tornou preponderante a discussão sobre a qualidade do ar do ambiente interno das edificações. A ventilação natural é um tema recorrente nas pesquisas, visto seu potencial de renovação do ar, essencial para sua qualidade (LIGHT; BAILEY; LUCAS, 2020). Ademais, a ventilação natural é uma estratégia de resfriamento passivo para obtenção de conforto térmico dos usuários (TRIANA; DE VECCHI; LAMBERTS, 2020). Em regiões tropicais, valores mais altos de velocidade do vento geram resfriamento fisiológico dos usuários e minimizam o ganho de calor nas edificações (CÂNDIDO *et al.*, 2010). Assim, o uso da ventilação também possibilita redução do consumo de eletricidade (TRIANA; DE VECCHI; LAMBERTS, 2020).

Em geral, as edificações naturalmente ventiladas são projetadas para funcionar sem um sistema mecânico de resfriamento ou aquecimento. A ventilação pela ação do vento ocorre através das aberturas presentes no edifício, como efeito dos diferenciais de pressão ao longo da envoltória (ETHERIDGE, 2015). Para essas edificações, as condições internas, como o conforto do usuário, dependem diretamente do projeto arquitetônico e da relação com o entorno imediato (SAKIYAMA *et al.*, 2020). Elementos externos, como muros ou cercas utilizadas para delimitar os lotes, reduzem a incidência da ventilação natural (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2015).

Os muros são componentes comuns em edificações residenciais em alguns países, como o Brasil, culturalmente utilizados para atender a necessidade de segurança e privacidade (KOWALTOWSKI *et al.*, 2006). Considerando que a ventilação natural é uma solução de resfriamento passivo adequado para as condições climáticas brasileiras, muros fechados podem se constituir em barreiras ao aproveitamento desse recurso.

Isso se torna mais prejudicial dentro do contexto das habitações de interesse social (HIS), visto que em sua maioria são construções térreas e em lotes pequenos (TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2015; MARROQUIM, 2017), onde o muro, elemento recorrente (SANTOS; BARROS; AMORIM, 2013), pode gerar mais interferência nas condições de ventilação (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2015). Além dessas características construtivas, os projetos de HIS são frágeis em conforto ambiental, eficiência energética e satisfação dos usuários, aspectos associados à falta de adequação climática das habitações (BAVARESCO *et al.*, 2021).

Na literatura foram identificados trabalhos que estudaram a influência dos muros ou barreiras na ventilação natural. De uma maneira geral, a maioria das pesquisas são anteriores da década de 1990 e, por conta do contexto climático e do escopo de pesquisa, foram mais voltadas ao uso de muros como quebra-ventos e não com ênfase no aproveitamento dos ventos (HEISLER; DEWALLE, 1988; OLGAY, 1998; RAINE; STEVENSON, 1977). Esses estudos contribuíram para a análise da influência de aspectos como: porosidade, dimensão, formato e posição da barreira em relação à incidência dos ventos. Apesar disso, seu foco de investigação eram barreiras isoladas em espaços abertos, não sendo considerada a interação entre barreiras e edificações.

Essa interação começou a ser investigada em trabalhos mais recentes, que evidenciaram os efeitos de diferentes configurações e formas de inserção do muro em edificações no comportamento dos ventos. Li, Wang e Bell (2007), Chang (2006) e Chang e Cheng (2009) constataram que a inserção do muro altera os coeficientes de pressão ou a distribuição de pressão nas fachadas. Esse efeito ocasionou a redução da velocidade do vento e da taxa de fluxo de ar e alterou o padrão de escoamento do vento, gerando zonas de estagnação e recirculação. Segundo os autores a intensidade e a ocorrência desses efeitos dependem dos parâmetros de configuração do muro, como: porosidade, altura e localização no lote (recuo frontal). Contudo esses trabalhos estudaram apenas a influência do muro posicionado no recuo frontal, sem avaliar o muro ao redor da edificação, como comumente ocorre em áreas residenciais.

Por outro lado, Hawendi e Gao (2017) investigaram uma edificação com base nas residências encontradas no Iraque, com muros isolando o acesso da casa (frontal e laterais). Os autores também identificaram que a inclusão do muro reduziu a incidência de fluxo de ar dentro da edificação, com a diminuição da taxa de ventilação. Contudo, concluíram que esse efeito foi positivo pois promoveu melhor distribuição da velocidade média interna, gerando mais conforto para os usuários. No entanto, os autores não exploraram a porosidade/permeabilidade do muro, um aspecto considerado importante (LI; WANG; BELL, 2007; CHANG, 2006; CHANG; CHENG, 2009), limitaram-se à variação da altura do muro.

Xavier e Lukiantchuki (2021) investigaram também o comportamento da ventilação natural em uma habitação com configurações de muro diferentes, explorando cenários com muros sólidos e permeáveis. As autoras concluíram que a substituição do muro sólido por um permeável ocasionou melhorias significativas nas

condições de ventilação, pois possibilitou a incidência de corrente de ar com maiores velocidades na edificação, semelhante ao cenário sem a presença de muro. Contudo, as autoras não consideraram a influência do muro frontal, apenas dos muros laterais e posterior.

Percebe-se que, apesar das contribuições das pesquisas citadas, ainda há muitos aspectos que podem ser explorados para se obter informações mais concretas dos efeitos dos muros nas edificações. Além disso, escassas pesquisas foram realizadas em climas tropicais, nos quais a ventilação natural é recomendada. Assim, o presente artigo teve como objetivo investigar os efeitos da incorporação de muros no fechamento das divisas do lote no comportamento dos ventos em habitações populares térreas.

Método

A pesquisa adotou uma abordagem metodológica exploratória, com a realização de simulações baseadas em dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*). A simulação por CFD é uma das abordagens mais empregadas em trabalhos correlatos, por conta da sua eficiência na previsão da ventilação natural, como também na redução de tempo e custo, em comparação às alternativas que necessitam da produção de protótipos físicos (SAKIYAMA *et al.*, 2020), tais como ensaios no túnel de vento. Apesar dos desafios envolvendo os diferentes aspectos da modelagem computacional para obter precisão e confiabilidade (BLOCKEN, 2018), os modelos CFD representam um importante recurso nos estudos de distribuição dos ventos.

Como ilustrado na Figura 1, a pesquisa foi dividida em três etapas. Os aspectos mais relevantes de cada etapa serão descritos nos próximos tópicos.

Descrição dos casos analisados

Os efeitos da incorporação de muros no comportamento da ventilação natural foram avaliados a partir de quatro cenários distintos (Figura 3):

- (a) cenário 1 (referência) – edificação sem o fechamento das divisas do lote: o cenário representa como as HIS são entregues aos usuários (SANTOS; BARROS; AMORIM, 2013; LACERDA; MARROQUIM; ANDRADE, 2011). Este caso servirá de referência comparativa para os demais casos;
- (b) cenário 2 – edificação com muros laterais e posterior (fundo): identificação do comportamento dos ventos na edificação sem a influência do muro frontal;
- (c) cenário 3 – edificação com todos os muros sólidos: o cenário mais recorrente nas habitações brasileiras, por questão de privacidade e segurança (SANTOS; BARROS; AMORIM, 2013; LACERDA; MARROQUIM; ANDRADE, 2011); e
- (d) cenário 4 – edificação com muro frontal com elementos vazados: identificar se existem vantagens na adoção de muros frontais mais permeáveis. Foi escolhido um elemento vazado do tipo quadriculado (25x25x15 cm)¹, que é um padrão popularmente conhecido, de fácil execução e baixo custo (Figura 2).

O modelo de habitação escolhido para fazer a investigação é uma casa térrea isolada. Trata-se de um modelo representativo desenvolvido por Triana, Lamberts e Sassi (2015). Para construção desse modelo a autora se baseou em levantamentos de projetos habitacionais executados em diferentes regiões do Brasil. O modelo foi utilizado em outros estudos com foco no desempenho térmico e energético (BRACHT; MELO; LAMBERTS, 2021; ELI *et al.*, 2021) e no comportamento da ventilação natural (NASCIMENTO, 2021).

¹Com base em elementos vazados comercializados (NEOREX, 2021).

Figura 1 - Organização metodológica da pesquisa

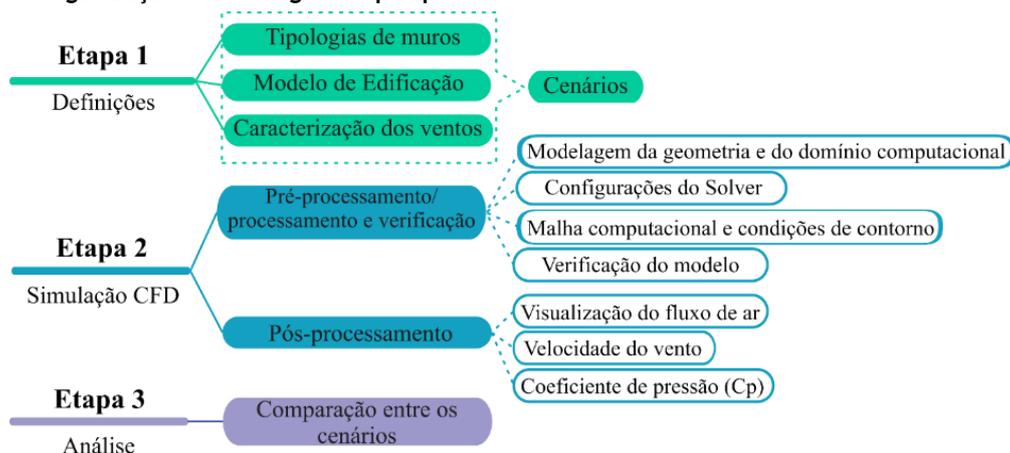
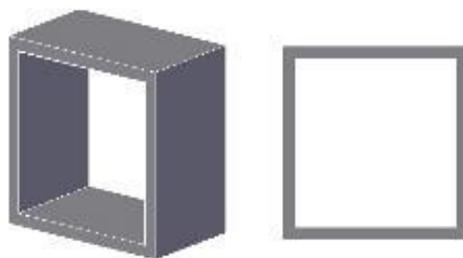


Figura 2 - Modelo de elemento vazado



O foco do presente trabalho foi a comparação entre os quatro cenários, por isso optou-se por fixar as demais condições de estudo (Quadro 1). Buscou-se definir o valor representativo de velocidade do vento, considerando as regiões brasileiras em que a ventilação natural fosse uma estratégia relevante para obtenção de conforto térmico (ABNT, 2005). Para isso foi realizado um levantamento dos valores médios de velocidades do vento das principais cidades da Zona Bioclimática 8². Utilizou-se tanto dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INSTITUTO..., 2021), coletados no período de 2011 a 2020, como também arquivos climáticos TMYx em formato EPW (LABORATÓRIO..., 2018)³. Foi fixado o ângulo de incidência dos ventos normal à fachada frontal, um ângulo de incidência recorrente na literatura (CHANG, 2006; CHANG; CHENG, 2009; HAWENDI; GAO, 2017).

Além dos dados de vento, outras características geométricas foram fixadas, como os recuos e a altura do muro (Quadro 1), e foram definidas com base em determinações recorrentes nas legislações municipais⁴ para HIS ou tipologia similar. Os recuos respeitaram as dimensões mínimas encontradas nas legislações. Destaca-se que um recuo frontal grande foi definido com base em trabalhos de avaliação pós-ocupação em HIS (LACERDA; MARROQUIM; ANDRADE, 2011; MARROQUIM, 2017).

Poucas legislações regulamentam a altura do muro, estas determinam valores de altura máxima. Algumas pesquisas de avaliação pós-ocupação ilustram a construção de muros altos em HIS (LOGSDON *et al.*, 2016; SANTOS; BATISTA; SARMENTO, 2022), assim definiu-se o valor mais predominante de altura máxima contido nas legislações.

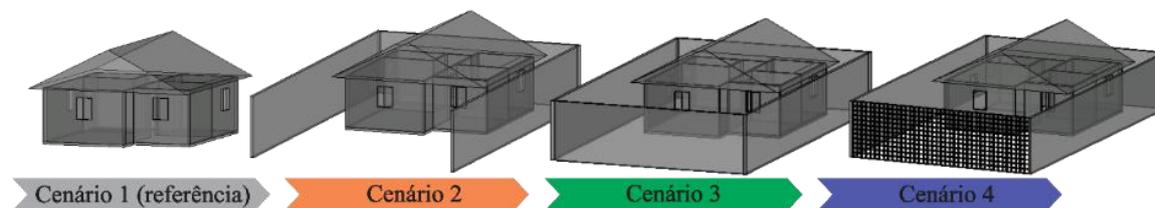
No caso do cenário 4, a porosidade do muro frontal foi definida com base em valores recorrentes na literatura correlata (LI; WANG; BELL, 2007; CHANG, 2006; CHANG; CHENG, 2009). O cálculo considerou a proporção entre o volume vazado (aberto) em relação ao volume total do muro frontal.

²Cidades pesquisadas: Belém (PA); Manaus (AM); Maceió (AL); Natal (RN); Salvador (BA); Fortaleza (CE); Recife (PE); João Pessoa (PB); Aracaju (SE); São Luís (MA); Macapá (AP); Rio Branco (AC); Rio de Janeiro (RJ).

³Utilizou-se os valores registrados para as direções predominantes dos ventos em cada cidade.

⁴Considerou-se as legislações das principais cidades da Zona Bioclimática 8 (ABNT, 2005).

Figura 3 - Cenários do estudo



Fonte: adaptado de Triana, Lamberts e Sassi (2015).

Quadro 1 - Parâmetros fixados no estudo

Parâmetro	Descrição síntese
Velocidade do vento	3 m/s ¹
Ângulo de incidência dos ventos	Normal à fachada frontal
Recuos	Frontal = 8 m; Laterais = 1,63 m; Posterior = 1,5 m
Altura do muro	3 m
Porosidade do muro vazado (frontal)	75%

Nota: ¹altura de referência = 10 m (estações meteorológicas), posterior correção para a altura das aberturas da edificação.

Modelo CFD

Geometria do modelo

A geometria foi modelada no software *Rhinoceros 7 (Rhino)* (ROBERT..., 2021) e exportada no formato *Parasolid*, para posterior edição na ferramenta *SpaceClaim* do software ANSYS (2020). Para modelagem da geometria, considerou-se o detalhamento dos componentes essenciais para análise, tanto do muro quanto da edificação, visando melhor economia no tempo de simulação.

Como é possível observar na Figura 4a, a edificação foi modelada com as paredes externas e internas de acordo com o modelo de habitação escolhido, apenas com simplificações na espessura do beiral do telhado. As dimensões das janelas foram definidas a partir da área efetiva de ventilação, descontando as partes de perfis e vidros (CENTRO..., 2018), conforme a tipologia de esquadria dos ambientes⁵. Apenas as portas internas referentes aos quartos foram modeladas abertas. A porta do banheiro e as portas externas foram consideradas fechadas por questões de privacidade e segurança, padrão estabelecido na NBR 15575-1 (ABNT, 2021).

Domínio

O domínio é o volume no qual o modelo está inserido, representando os limites espaciais da simulação. Foi escolhido um formato retangular para otimizar o processo de simulação (Figura 4b), pois essa configuração necessita de uma quantidade menor de elementos de malha em relação aos formatos circular ou octogonal (LUKIANTCHUKI, 2015). As dimensões escolhidas para o domínio (Tabela 1) seguiram as recomendações do documento COST C14 (FRANKE *et al.*, 2004), sendo a porcentagem da área de obstrução da edificação no domínio dentro de 3%. Assim, impede-se que ocorra o efeito de blocagem, no qual as fronteiras do domínio exerceriam efeito no escoamento.

Configurações do Solver

Neste trabalho, o solver utilizado para a solução numérica da análise CFD foi o ANSYS CFX (versão 2020 R2), que tem como base o método dos volumes finitos (ANSYS, 2020). O escoamento do ar que envolve a edificação foi tratado como estático, ideal e turbulento. As equações governantes de massa, momento e energia foram resolvidas através da abordagem Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS), e o modelo k-ε padrão foi adotado para tratamento dos efeitos de turbulência. Esse modelo resolve a energia cinética de turbulência, k, e sua taxa de dissipação, ε. Essa é a abordagem mais recorrente em trabalhos correlatos (SAKIYAMA *et al.*; 2021; XAVIER; LUKIANTCHUKI, 2021) por conta do custo-benefício, apresentando resultados

⁵Todas as janelas são do tipo correr com duas folhas, com exceção do banheiro, que possui janela do tipo basculante (TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2015).

suficientemente precisos, com menor complexidade e custo computacional em comparação com outras abordagens, como a Large Eddy Simulation (LES) (BLOCKEN, 2018). Segundo Blocken (2018), apesar da superioridade de acurácia da abordagem LES, RANS é mais consolidada em áreas como conforto do vento e ventilação natural em edifícios.

Malha e condições de contorno

Em simulações CFD, a qualidade da malha computacional está diretamente relacionada à precisão e convergência das soluções. Os parâmetros de geração da malha definem a quantidade de seus elementos e, conseqüentemente, a demanda computacional e o tempo de simulação requeridos. As malhas do estudo foram geradas no módulo *Ansys Meshing* (ANSYS, 2020) e foram constituídas por elementos tetraédricos e prismáticos (Figura 5), levando em consideração a capacidade de processamento computacional.

Foi adotada uma função de malha denominada *Proximity*, que permite especificar o número mínimo de camadas de elementos criadas em regiões que constituem “gaps” dentro do modelo. Um “gap” é definido de duas maneiras no *Ansys Meshing*: uma região volumétrica entre duas faces ou uma área entre duas arestas de contorno de uma face dentro do modelo computacional geométrico. Dessa forma, foi possível estabelecer quantas camadas de elementos de malha iriam preencher espaços estreitos dentro do modelo, como na região dos elementos vazados. Também foi utilizada uma ferramenta de malha local denominada *Inflation*. Através dos parâmetros definidos nessa ferramenta pode-se gerar camadas de elementos prismáticos, que permite melhor captura de efeitos de camada limite em regiões próximas às paredes do modelo. O Quadro 2 descreve os parâmetros globais utilizados para a geração da malha e os parâmetros aplicados na ferramenta *Inflation*.

Nas áreas de maior importância, foi definido um refinamento local nas malhas dos modelos. Nas superfícies da edificação foi determinado um tamanho de elemento igual a 100 mm, enquanto nas arestas do muro, especialmente no modelo com elementos vazados, foram definidos tamanhos de malha igual a 30 mm (Figura 5).

Figura 4 - Modelos

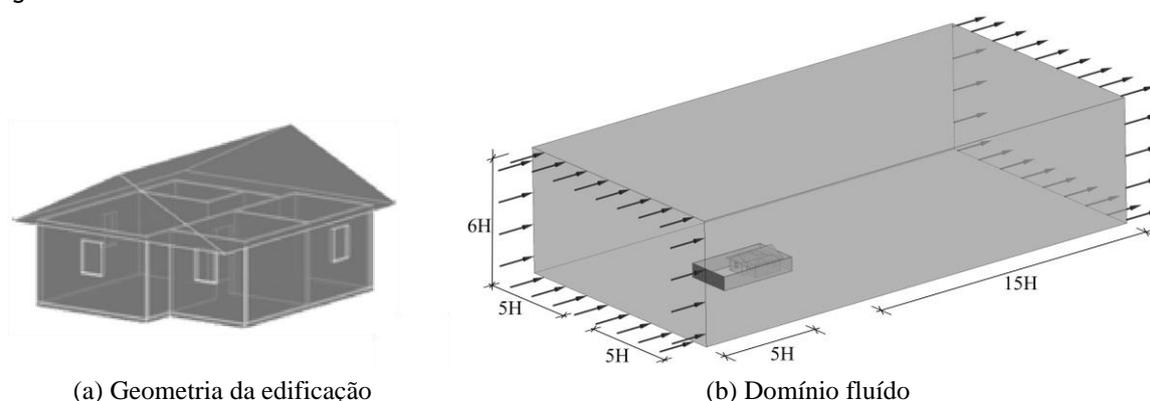


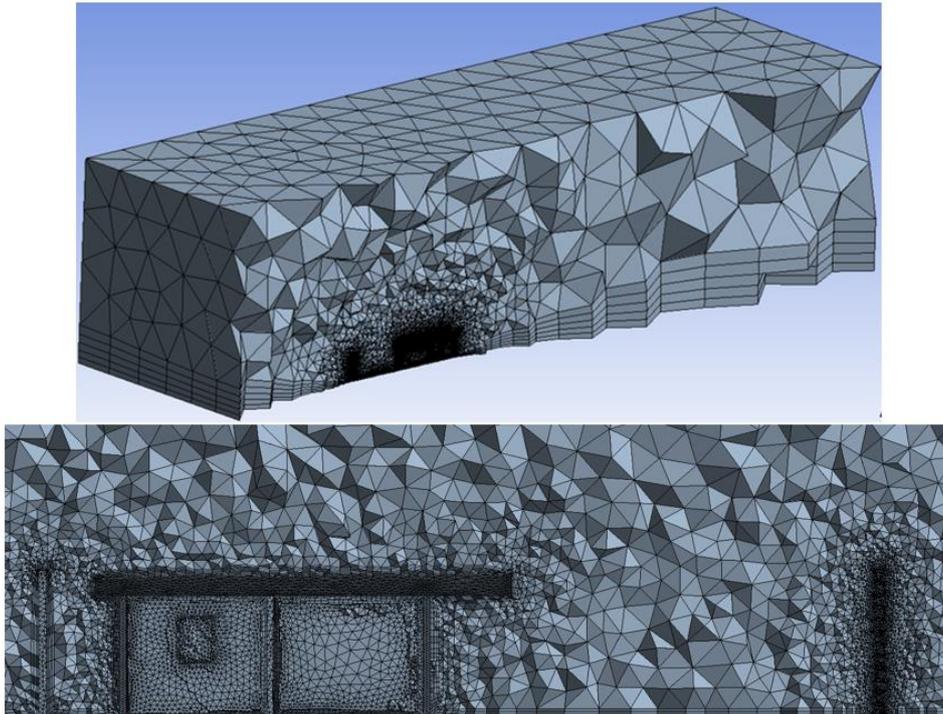
Tabela 1 - Dimensões do domínio

Dimensões	Recomendação	Valor adotado (aprox.)
A distância da entrada (barlavento) e laterais para qualquer obstáculo	5H*	22,5
A distância da saída (sotavento) para qualquer obstáculo	15H*	67,5
Altura do domínio	6H*	27

Fonte: adaptado de COST C14 (FRANKE *et al.*, 2004).

Nota: *H corresponde à altura da edificação, na pesquisa esse valor é aproximadamente 4,5 m.

Figura 5 - Ilustração da malha gerada

Quadro 2 - Parâmetros globais de geração da malha e os aplicados na ferramenta *Inflation*

Parâmetros globais	Valor/opção
<i>Max size</i>	12.000 mm
<i>Growth rate</i>	1,2
<i>Defeature size</i>	20 mm
<i>Capture proximity</i>	<i>Yes</i>
<i>Proximity min size</i>	30 mm
<i>Num cells across gap</i>	3
Parâmetros <i>Inflation</i>	Valor/opção
<i>Inflation option</i>	<i>Smooth transition</i>
<i>Transition ratio</i>	0,272
<i>Maximum layers</i>	5
<i>Growth rate</i>	1,1

A malha gerada para os modelos foi estabelecida com base em vários parâmetros, sendo eles a qualidade da malha, critérios de convergência, testes de sensibilidade e os resultados de y^+ (*Yplus*). A qualidade dos elementos da malha foi verificada utilizando métricas presentes no próprio módulo *Ansys Meshing* (ANSYS, 2020). Essas métricas medem a distorção dos elementos de malha com base em um elemento de referência ideal. Maiores erros são gerados quando existe uma distorção grande dos elementos. Para essa análise foi utilizada a métrica *Skewness*, que compara a simetria entre os lados e ângulos de cada elemento de malha. A métrica é classificada dentro do intervalo de 0 a 1, sendo os valores próximos de 1 não aceitáveis, pois correspondem a elementos degenerados e distantes das condições ideais. Para todos os casos simulados, a média de *Skewness* ficou cerca de 0,3, indicando que as malhas apresentaram boas condições (Tabela 2).

O controle da solução matemática foi determinado a partir do critério de convergência RMS (*Root Mean Square*). O critério de convergência determina quando a solução é alcançada, fazendo o solver parar de realizar iterações. Como critério de convergência utiliza-se principalmente o alcance de resíduos adequados, que é um indicativo de que as equações foram solucionadas corretamente e a malha obteve um refinamento necessário (CÓSTOLA; ALUCCI, 2011; VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Tabela 2 - Dados das malhas e da métrica *Skewness*

Modelo	Elementos	Nós	Tempo para solução (s)	<i>Skewness</i>			
				Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Caso 1	804.274	241.154	6,15E+02	2,23E-04	0,93492	0,28129	0,15452
Caso 2	1.581.494	456.404	1,29E+03	3,86E-04	0,96526	0,33316	0,16206
Caso 3	1.739.457	504.522	1,40E+03	2,64E-04	0,97804	0,33371	0,16094
Caso 4	4.578.015	1.300.544	4,79E+03	5,61E-05	0,92454	0,30279	0,17328

Com base na COST C14 (FRANKE *et al.*, 2004), o critério de convergência adotado foi o RMS com o valor máximo de 10^{-4} . Valores acima dessa marca revelam que os resultados não são precisos o suficiente. Considerando esse critério, foram monitorados os níveis residuais para todas as variáveis resolvidas: conservação de massa (RMS P-Mass), conservação de quantidade de momento (RMS U-Mom, RMS V-Mom e RMS W-Mom), energia cinética turbulenta k e a sua taxa de dissipação ϵ , (E-Diss.K e K-TurbKE). Foi adotado um número máximo de 100 iterações em todas as simulações, a fim de que todos os casos pudessem atingir a convergência dos resíduos estabelecidos. A Figura 6 apresenta esses resíduos para o exemplo do caso 3, porém todos os casos atingiram a convergência.

O y^+ pode ser descrito como um número adimensional associado com o tamanho da primeira célula do domínio fluido próxima à parede. Assim, o valor obtido indica a capacidade da malha em capturar adequadamente o fenômeno do escoamento próximo à parede (camada limite) (LUKJANTCHUKI *et al.*, 2018; CÓSTOLA; ALUCCI, 2011). Ele pode ser expresso por (Equação 1):

$$y^+ = \frac{\rho \Delta y u^*}{\mu} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

ρ : massa específica (kg/m³);

Δy : distância do primeiro ponto da malha até a parede (primeira camada) (m);

u^* : velocidade de fricção na parede (m/s); e

μ : viscosidade dinâmica (N s/m²).

Para capturar corretamente o fenômeno é preciso gerar camadas de prismas adjacentes às condições de contorno da parede. A recomendação é gerar uma camada prismática com valores de y^+ dentro do intervalo entre 20 (mínimo) e 300 (máximo), sendo aceitáveis valores até 1.000 (LUKJANTCHUKI *et al.*, 2018; CÓSTOLA; ALUCCI, 2011). Ressalta-se que o y^+ não pode ser fixado no início da simulação, visto que é um dado de saída (CÓSTOLA; ALUCCI, 2011). Assim, no final de cada simulação foram avaliados os valores na superfície da parede (região *WALL*).

A Figura 7 ilustra o comportamento do y^+ em um dos casos analisados (caso 4), os demais casos obtiveram resultados semelhantes. Observa-se valores de y^+ acima de 300 somente em regiões fora da área de interesse no modelo. Algumas regiões dentro do modelo apresentaram valores de y^+ menores do que 20, sendo áreas internas da edificação e o componente vazado do muro.

Os valores encontrados nas áreas internas da edificação podem ser associados aos valores baixos de velocidade do vento calculados nessas áreas do modelo, como será observado nos resultados das simulações.

Em relação ao componente vazado, vincula-se a dificuldade com o conflito entre aumentar a espessura da primeira camada prismática para o alcance de melhores valores de y^+ , e a tendência de reduzir os elementos de malha para representar adequadamente as pequenas dimensões da geometria do componente. Constatações semelhantes também foram identificadas em outras pesquisas como a de Leite e Frota (2013) e Lukjantchuki (2015).

Figura 6 - Resíduos da solução para o caso 3

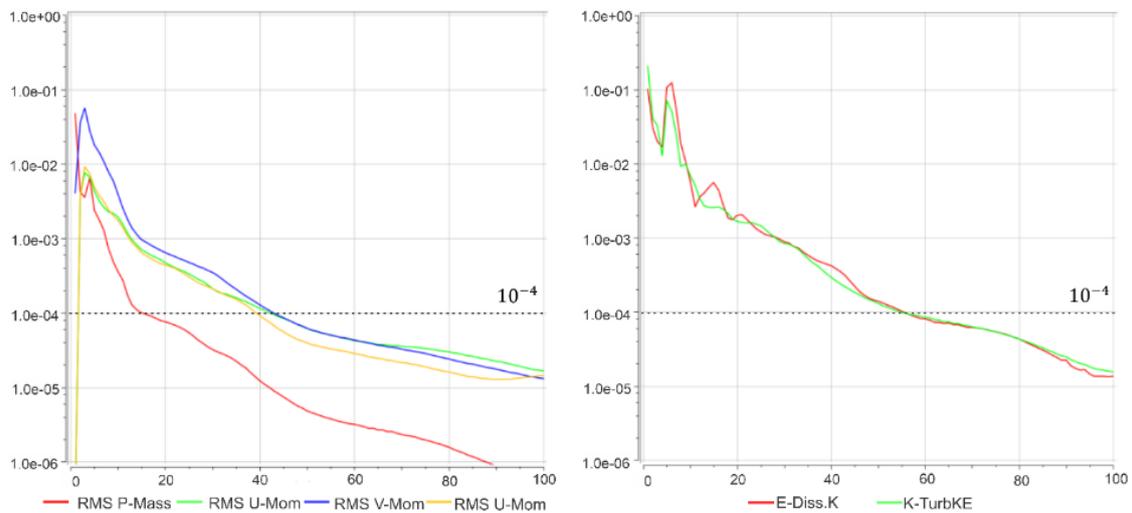
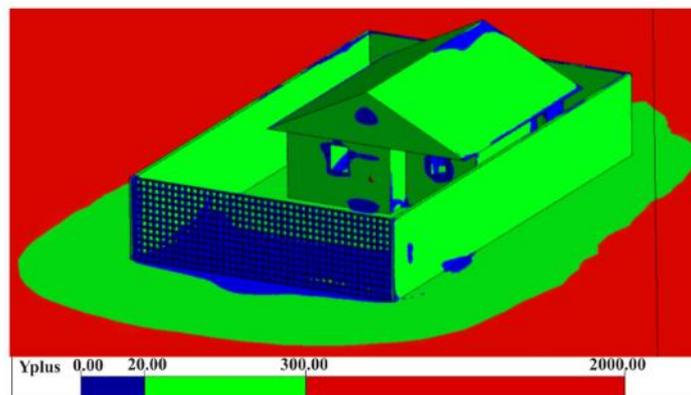


Figura 7 - Resultado do y^+ para região WALL (caso 4)



Outros fatores que influenciam na precisão dos resultados da simulação são as condições iniciais e de contorno, as quais foram definidas no estudo com base em pesquisas CFD (BLOCKEN, 2018; LUKIANTCHUKI *et al.*, 2018). Destaca-se que as superfícies do edifício e do piso do domínio foram modeladas como *no slip wall* (com atrito), em contraste com as superfícies laterais e do teto do domínio, que foram definidas como *free slip wall* (sem atrito), reduzindo a influência dessas superfícies no escoamento do fluido. Foi inserido um perfil de camada limite atmosférica (Figura 8) considerando o coeficiente de rugosidade do terreno para a área urbana (suburbana), de acordo com a Equação 2:

$$V/V_m = kz^a \tag{Eq. 2}$$

Onde:

V: velocidade do vento para a altura da abertura (m/s);

V_m : velocidade média do vento medida na estação meteorológica (m/s);

Z: altura da abertura (m);

k, a: coeficientes de rugosidade do terreno, sendo $k = 0,35$; e

$a = 0,25$ para área urbana (suburbana) (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2015).

Para garantir que a malha analisada estivesse adequada para uma boa representação do modelo e gerasse resultados confiáveis foram realizadas análises de sensibilidade, com um estudo de refinamento da malha. Este estudo consistiu em simular as condições de contorno apresentadas anteriormente para 3 níveis de malha (grossa, média, fina), para cada caso estudado. Posteriormente foi feita uma comparação do perfil de velocidade ao longo do comprimento da residência, com a aplicação do método de convergência de malha

Grid Convergence Index - GCI (CELIK *et al.*, 2008). A Figura 9 apresenta os resultados das 3 malhas, além da curva com os valores extrapolados de velocidade, para o caso 4. Essa curva consiste em uma estimativa do perfil real de velocidade (tamanho de malha representativo $h = 0$) com base na ordem de convergência. A Tabela 3 apresenta os dados das malhas e a incerteza numérica, dada pelo índice de convergência de malha GCI. Através desses dados verificou-se que a análise apresentou bons resultados, com a incerteza numérica decrescendo conforme o refinamento da malha.

Figura 8 - Perfil da camada limite atmosférica

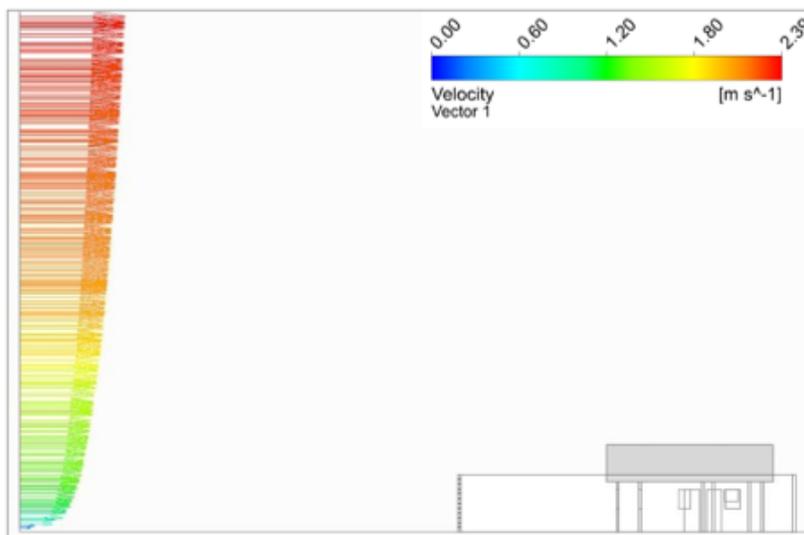
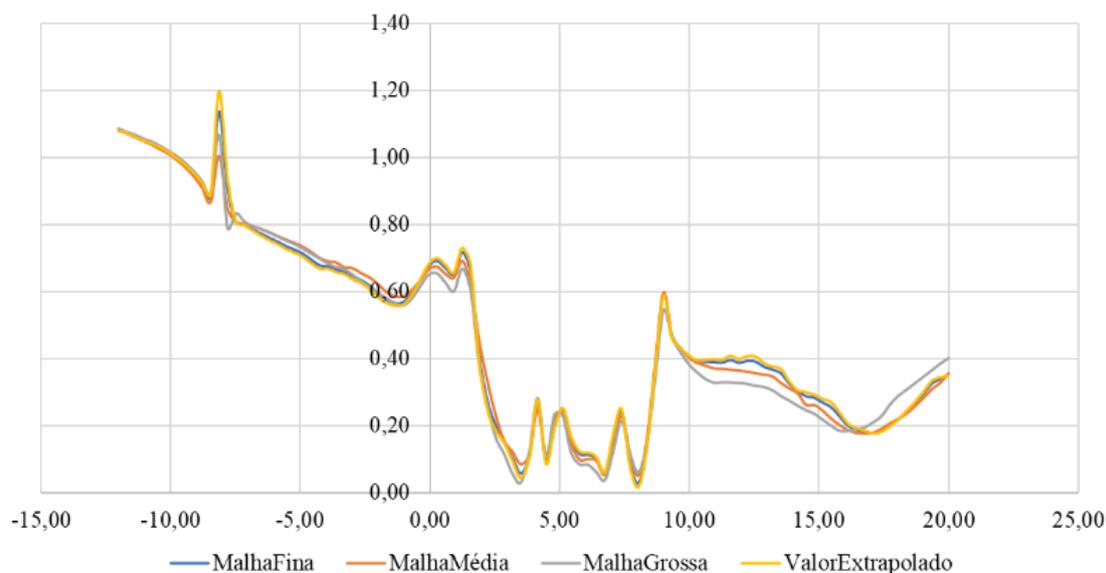


Tabela 3 - Dados das malhas e dos testes de sensibilidade de malha (caso 4)

Modelo	Elementos	Nós	Tempo para solução (s)	Estudo GCI	
				Tamanho de malha h	GCI
Malha grossa	739.427	210.398	7,69E+02	0,896 m	
Malha média	2.000.160	572.681	1,96E+03	0,641 m	3,7%
Malha fina	4.578.015	1.300.554	4,79E+03	0,488 m	3,6%

Figura 9 - Comparação do perfil de velocidade das malhas geradas para o caso 4 e o valor extrapolado (método GCI)



Validação do modelo CFD

A validação da simulação CFD é uma etapa imprescindível para garantir a coerência dos resultados (BLOCKEN, 2018). Na presente pesquisa, a validação consistiu na verificação do procedimento numérico do modelo CFD, utilizando como base resultados experimentais da literatura. Para realização dessa validação, foi aplicado o procedimento semelhante ao de Sakiyama *et al.* (2021) e Ramponi e Blocken (2012), que compararam os componentes de velocidade do modelo CFD com resultados experimentais do trabalho de Karava, Stathopoulos e Athienitis (2011).

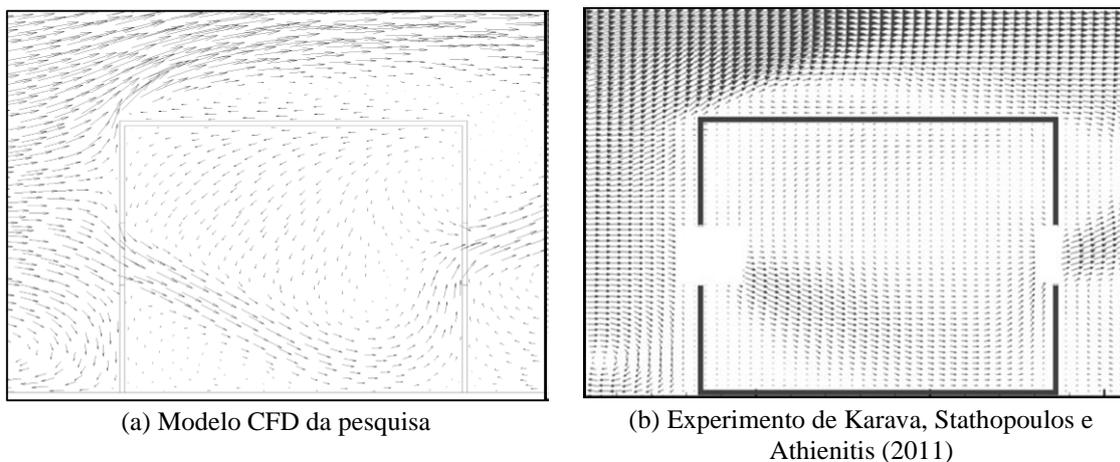
Karava, Stathopoulos e Athienitis (2011) realizaram ensaios em túnel de vento utilizando a técnica de velocimetria por imagem de partículas (PIV); o objetivo era medir o campo da velocidade do vento dentro de um edifício sob condição de ventilação cruzada. O PIV é um recurso adequado para esse objetivo, pois permite a medição simultânea do fluxo de ar externo e interno, semelhante a uma simulação CFD acoplada (RAMPONI; BLOCKEN, 2012). Uma das finalidades do trabalho de Karava *et al.* (2011) era fornecer dados experimentais para validar modelos CFD.

O processo de validação utilizou como base as dimensões do modelo “Configuração E1” e as condições do fluxo de ar de Karava, Stathopoulos e Athienitis (2011), mantendo as outras condições do escoamento e de contorno de acordo a descrito anteriormente. Além do trabalho de Karava, Stathopoulos e Athienitis (2011), o perfil do componente de velocidade do modelo de simulação foi comparado com os resultados de Sakiyama *et al.* (2021) e Ramponi e Blocken (2012). O modelo de turbulência adotado no trabalho de Sakiyama *et al.* (2021) foi o modelo k- ϵ padrão, enquanto em Ramponi e Blocken (2012) foi empregado o modelo k- ω SST (Shear-Stress Transport).

A Figura 10 apresenta a comparação entre o campo de velocidade vetorial da malha mais fina testada na validação com a do experimento de Karava, Stathopoulos e Athienitis (2011). Enquanto a Figura 11 ilustra o perfil do componente x da velocidade, normalizada pela velocidade na altura do edifício (U_x/U_{ref}) ao longo de uma linha de medição horizontal (L). Através dessas figuras é possível verificar que, apesar de algumas diferenças, a modelagem matemática da simulação CFD demonstrou concordância satisfatória com as medições experimentais de Karava, Stathopoulos e Athienitis (2011). A comparação com os estudos de Sakiyama *et al.* (2021) e Ramponi e Blocken (2012) confirmou que o modelo CFD do presente estudo tem o potencial de reproduzir a tendência da velocidade.

A Tabela 4 apresenta as médias do erro da norma L2 em 100 pontos igualmente espaçados ao longo do eixo x das curvas do perfil de velocidade (Figura 10) das malhas testadas em relação à curva dos trabalhos referência. Destaca-se que as malhas testadas apresentaram um bom índice de convergência GCI (CELIK *et al.*, 2008), comprovado pela redução da porcentagem de incerteza entre a malha mais refinada e a malha média (Tabela 5). Além disso, as malhas obtiveram valores satisfatórios para o y^+ , a exemplo dos resultados ilustrados na Figura 12 para a malha 2.

Figura 10 - Campo de velocidade vetorial em plano de corte vertical



Fonte: (a) autores (2022); e (b) adaptado de Karava, Stathopoulos e Athienitis (2011).

Figura 11 - Comparação do perfil do componente de velocidade com medições experimentais e outros modelos CFD

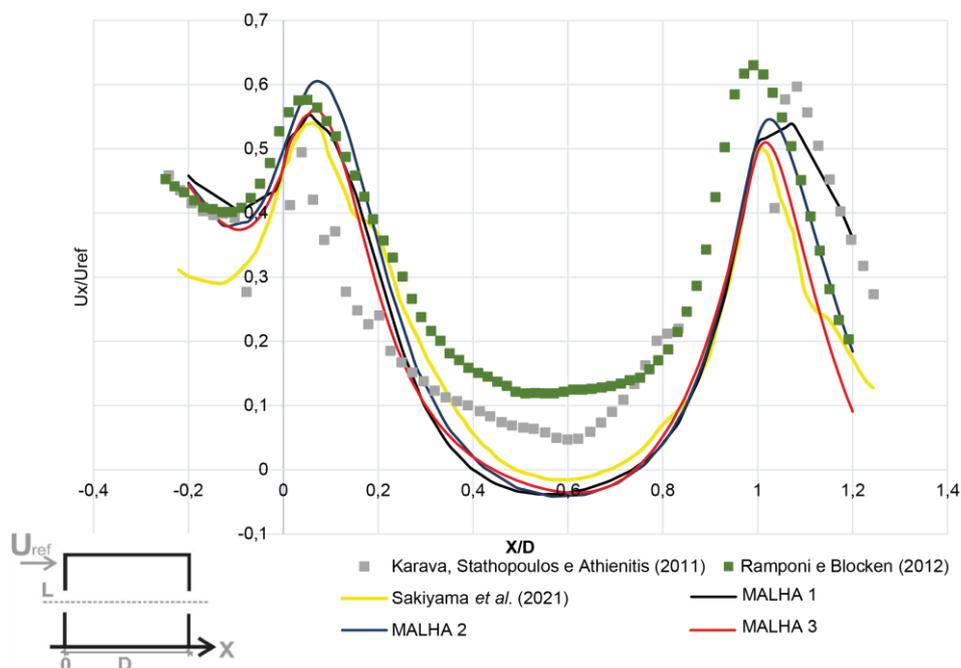


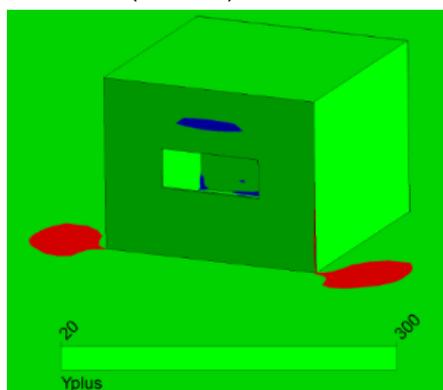
Tabela 4 - Erro da norma L2 entre os resultados do perfil de velocidade das malhas testadas com estudos de referência

Malhas	Karava, Stathopoulos e Athienitis (2011)	Ramponi e Blocken (2012)	Sakiyama <i>et al.</i> (2021)
Malha 1 (grossa)	0,0989	0,1262	0,0843
Malha 2 (média)	0,1240	0,1133	0,0610
Malha 3 (fina)	0,1268	0,1203	0,0475

Tabela 5 - Dados das malhas e da métrica *Skewness*

Modelo	Elementos	Nós	Tempo para solução (s)	Estudo GCI	
				Tamanho de malha h	GCI
Malha 1	240.336	262.320	9,02E+02	1,425 m	
Malha 2	433.098	461.342	1,28E+03	1,171 m	38,8%
Malha 3	1.155.993	1.095.880	1,99E+03	0,844 m	12,0%

Figura 12 - Resultado de y^+ representativo (malha 2)



Pós-processamento

O comportamento da ventilação natural foi analisado qualitativamente e quantitativamente. A análise qualitativa foi composta da visualização do fluxo de ar nos cenários analisados. Para a análise quantitativa as variáveis adotadas foram a velocidade do vento e os coeficientes de pressão. Cada aspecto será explicado nos tópicos a seguir.

Visualização do padrão de fluxo de ar

Para visualização do escoamento, foram definidos três planos de corte, um horizontal e dois verticais (no sentido do fluxo). O plano horizontal foi posicionado a 0,85 m do solo, seguindo as definições do regulamento ISO 7726 (INTERNATIONAL..., 1998)⁶. Esses planos verticais foram posicionados de forma que seccionassem as aberturas a barlavento da edificação (Figura 13). Nos planos foram plotados contornos por gradação de cores, para as velocidades do vento e *streamlines* com a direção do fluxo.

Velocidade do vento

Além dos contornos plotados nos planos de corte, foram distribuídas linhas transversais com pontos de medição ao longo das diferentes regiões do modelo (externas ao lote, recuos e dentro da edificação) para o monitoramento da velocidade do vento (Figura 14). Cada linha possui aproximadamente 100 pontos de medição. O intuito foi possibilitar a construção de um perfil do comportamento da velocidade média do vento ao longo do modelo, através do cálculo do valor médio dos pontos de medição de cada linha. Estabeleceu-se a distância de 0,85 m entre os pontos e o solo, com base nas definições do regulamento ISO 7726 (INTERNATIONAL..., 1998).

Também foi realizada a análise relacionando os valores de velocidade do vento com as condições de ventilação natural e seu rebatimento no conforto térmico. Para esta análise considerou-se a “escala cromática” desenvolvida por Morais (2013)⁷. A escala é composta de quatro níveis de velocidades médias, sendo observado uma redução da carga térmica no intervalo de 0,41 a 0,80 m/s (Figura 15).

Coefficientes de pressão (Cps)

Para análise da distribuição dos Cps foram plotados contornos por gradação de cores nos modelos 3D. O intuito foi verificar o comportamento dos Cps nas fachadas da edificação. Além disso, foram extraídos os valores do Cp médio de cada janela (Figura 16) com base na Equação 3:

$$C_p = \frac{P_x - P_e}{\frac{1}{2} \rho V_{ref}^2} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

Cp = Coeficiente de pressão (adimensional);

P_x = Pressão média na janela (Pa). Calculada pela integral dos valores de pressão na superfície da janela;

P_e = Pressão estática de referência, do fluxo de ar não perturbado (Pa). Nas condições da simulação computacional, a pressão estática de referência é adotada como sendo nula;

ρ = Massa específica do ar (kg/m³). Nas condições de temperatura de 25 °C e pressão de 1atm, têm-se que ρ = 1,184 kg/m³; e

V_{ref} = Velocidade do fluxo (m/s) medida em um ponto antes da alteração sofrida pelos obstáculos, geralmente na cota da cobertura do edifício. Sendo a altura do edifício igual a 4,60 m, considerou-se V_{ref} = 1,53 m/s.

⁶A ISO 7726 (INTERNATIONAL..., 1998) define as áreas sensitivas do corpo humano.

⁷Morais (2013) desenvolveu a escala cromática com base nos estudos de Bedford (1948* *apud* MORAIS, 2013), Allard (1998** *apud* MORAIS, 2013) e Cândido *et al.* (2010).

*BEDFORD, T. *Basic principles of ventilation and heating*. London: H.K. Lewis, 1948.

**ALLARD, F. *Natural ventilation in buildings: a design handbook*. London: James e James, 1998.

Resultados

A análise dos resultados para os quatro cenários descritos anteriormente foi dividida com base nas variáveis analisadas:

- (a) visualização do padrão do fluxo de ar e velocidade do vento; e
- (b) coeficientes de pressão.

Figura 13 - Planos de corte

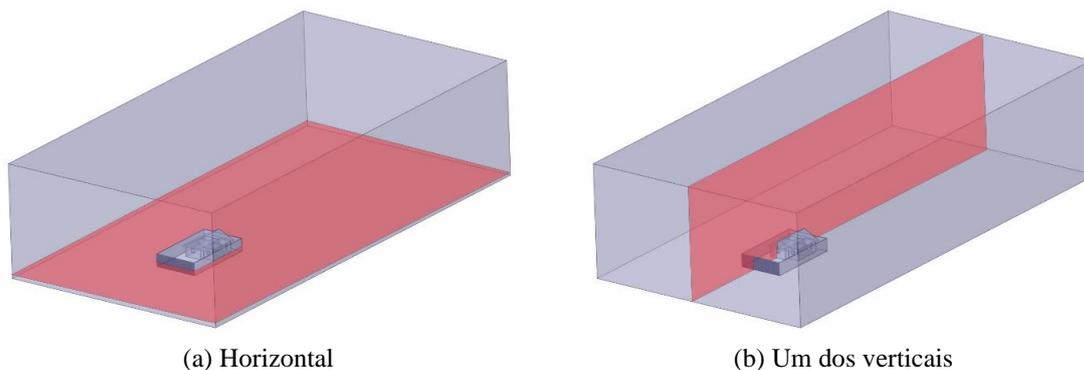


Figura 14 - Localização das linhas de medição da velocidade do vento

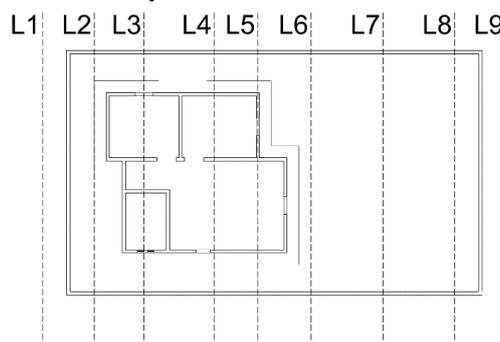
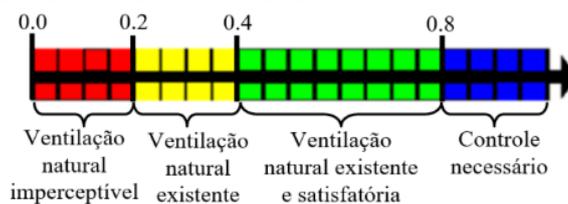


Figura 15 - Escala cromática de velocidades médias do vento



Fonte: adaptada de Morais (2013).

Figura 16 - Extração dos valores de Cps médios das aberturas do modelo

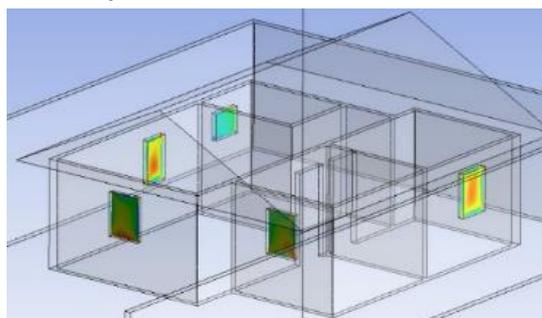


Figura 17 - Plano de corte horizontal (0,85 m) com a distribuição do escoamento e os contornos de velocidade

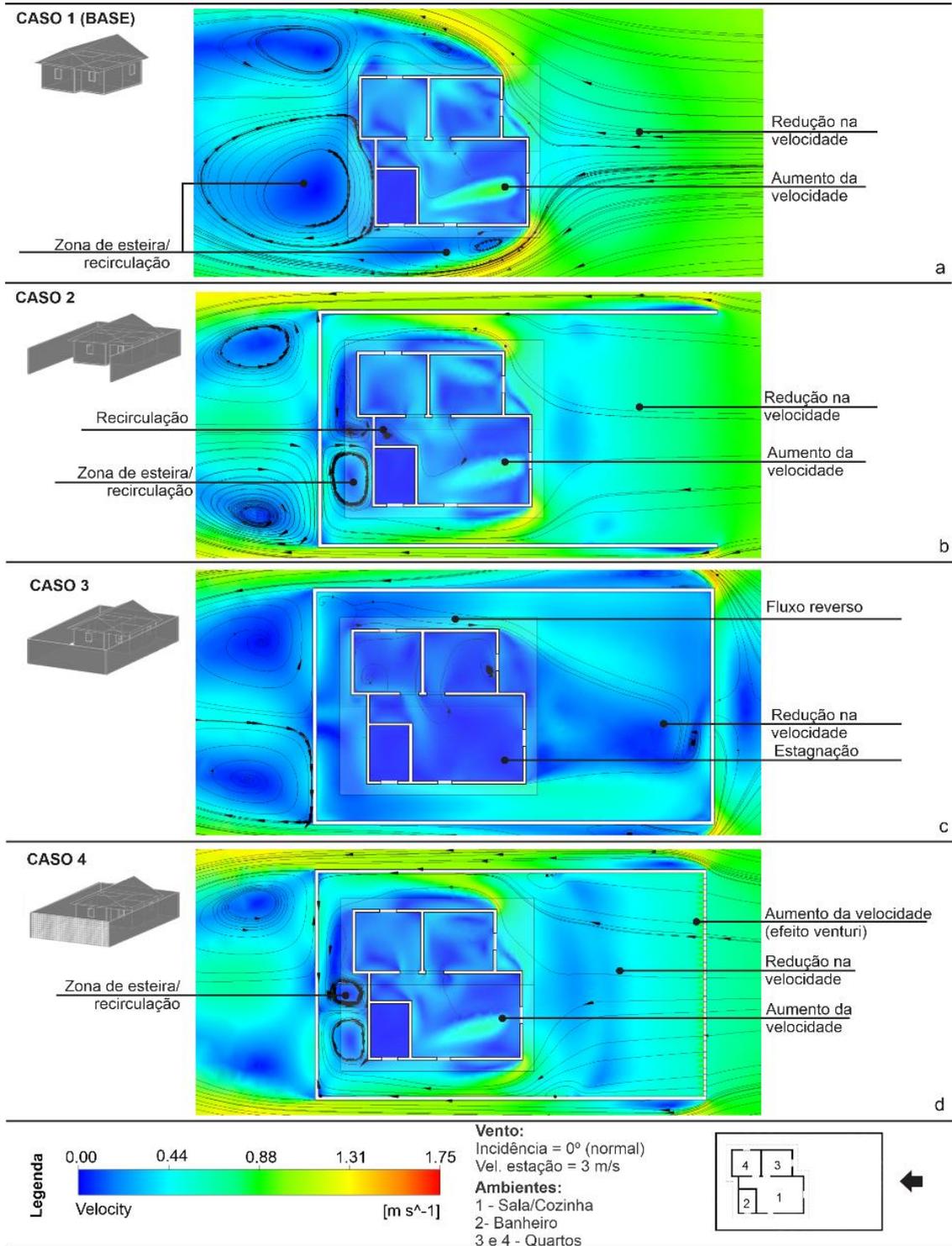
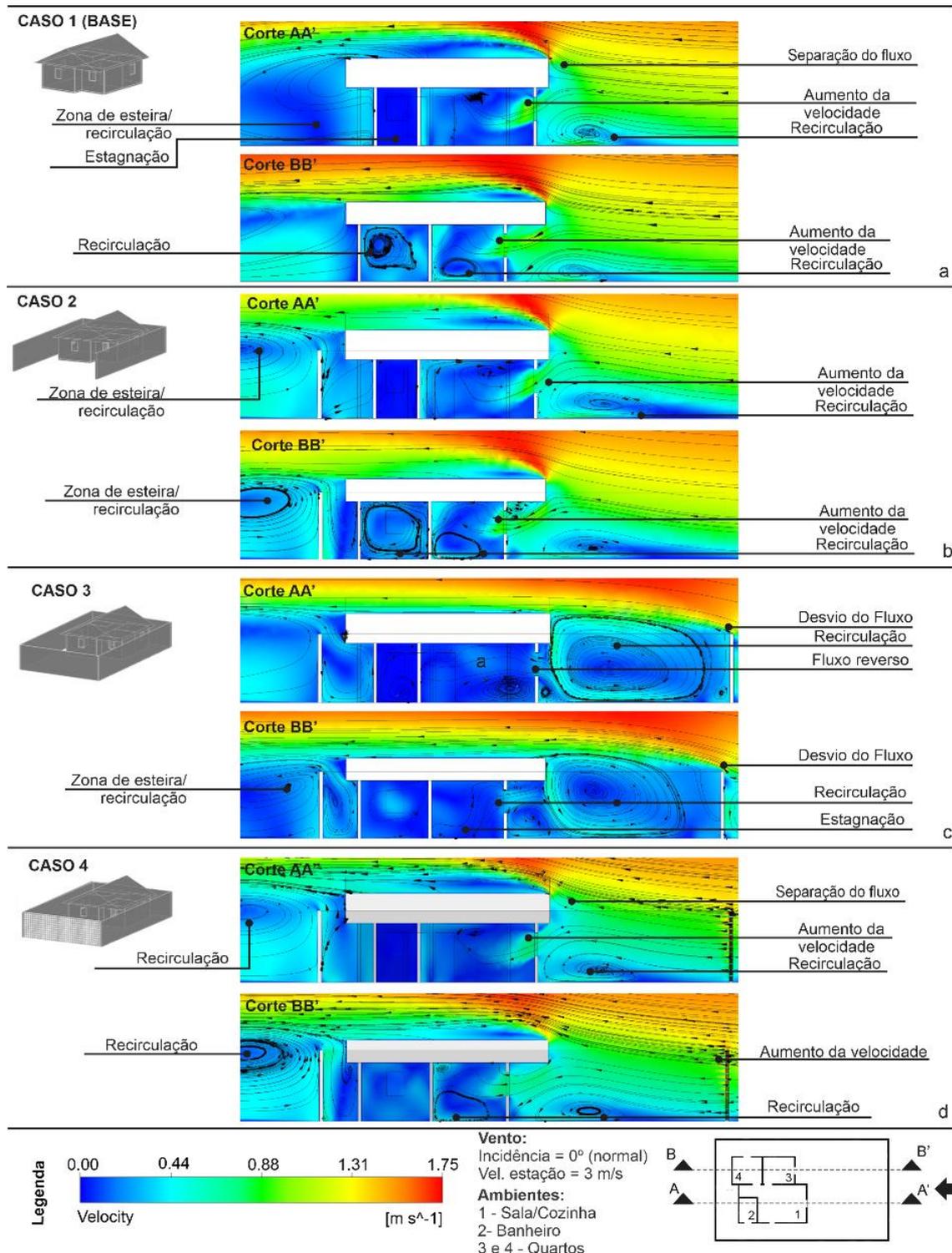


Figura 18 - Planos de corte verticais com a distribuição do escoamento e os contornos de velocidade



Visualização do padrão do fluxo de ar e velocidade do vento

No caso base (caso 1), conforme esperado, percebe-se que o fluxo de ar ao encontrar a edificação reduz a velocidade e se separa em direção as laterais e para o telhado (Figuras 17a e 18a). Uma parte desse fluxo incide na edificação através das janelas presentes na fachada frontal (sala e quarto) e outra parte retorna para o recuo, gerando uma área de turbulência. Nas áreas laterais e posterior da edificação forma-se uma zona de esteira,

com baixas velocidades, o que reduz a incidência de vento pelas janelas laterais da edificação. A região da sala/cozinha possui maiores velocidades devido à ventilação cruzada entre as duas aberturas presentes no ambiente, contudo esse padrão não é uniforme. Nos outros ambientes a velocidade do vento assume valores menores, devido à ventilação unilateral.

Através dos dados quantitativos (Figura 19), verifica-se que a média da velocidade do vento se reduz ao longo do modelo. Na região de recuo frontal, a redução da velocidade média foi de aproximadamente 37% em comparação com a velocidade do fluxo livre (velocidade sem a interferência de qualquer obstáculo), com valores acima de 0,74 m/s. Nas áreas internas, os valores variaram conforme o ambiente, na sala/cozinha houve regiões em que os valores ficaram acima de 0,40 m/s, o que pode ser considerado uma ventilação natural satisfatória para o conforto térmico. Contudo, o mesmo não ocorreu nos demais ambientes, sendo a média geral da velocidade do vento aproximadamente 0,28 m/s, uma redução de cerca de 76% em relação ao fluxo livre, o que classificaria a ventilação natural apenas como existente, não satisfatória.

Analisando o caso 2, percebe-se que o fechamento parcial do lote ocasionou mudanças no fluxo de vento, sobretudo reduzindo a sua circulação e intensidade (Figuras 17b e 18b). No recuo frontal percebe-se uma suavização das áreas de turbulência e os contornos assumem menores valores de velocidade. Nos recuos laterais a extensão da zona de esteira se reduz, diminuindo os vórtices. Em contrapartida, no recuo posterior, a presença do muro gera mais zonas de turbulência próximas da edificação. Nos ambientes internos, observa-se uma suavização dos contornos de velocidade, reduzindo também a intensidade dos vórtices.

Na Figura 19, é possível verificar que no caso 2 ocorreram reduções nos valores de velocidade média do vento. Na frente do lote (L9) o valor médio foi de aproximadamente 0,89 m/s, o que indica uma pequena redução de 5% em relação ao caso 1, ou seja, comportamentos similares entre os casos (Figura 20). Contudo, a redução no recuo frontal (L6, L7 e L8) foi maior, em comparação com o caso 1 foi de 18%, sendo o valor médio de aproximadamente 0,60 m/s. Já no interior da edificação os valores de velocidade média do vento foram mais semelhantes ao caso 1, ocorrendo apenas uma redução de cerca de 3%. As velocidades médias internas foram de aproximadamente 0,27 m/s, o que classifica a ventilação natural como existente e não satisfatória para fins de conforto térmico, situação já observada no caso base.

No caso 3 (Figuras 17c e 18c), observa-se que o fechamento total do lote gerou mudanças mais acentuadas no comportamento da ventilação natural em relação ao caso base, do que o caso 2 (Figuras 17b e 18b). O escoamento que ultrapassa o muro tende a se deslocar em maior intensidade para cima do telhado. Este redireciona parte do fluxo para o recuo frontal, criando uma área de turbulência. Os contornos de velocidade nessa região suavizaram, com a formação de uma área de estagnação. Esse comportamento prejudicou a incidência da ventilação dentro da edificação, onde percebe-se a ocorrência de um fluxo reverso (Figura 18c), em que as aberturas a barlavento funcionam também como saída de vento. Em todos os ambientes internos, nota-se um padrão uniforme, com baixa circulação e velocidades do vento.

Os dados quantitativos para o caso 3 (Figura 19) confirmaram o padrão de fluxo de vento identificado nos planos de corte, visto que se percebe uma redução drástica dos valores de velocidade do vento a partir do momento em que o fluxo se aproxima do modelo. A média dos valores na região a barlavento do muro decaem cerca de 74% em relação ao fluxo livre. Já na região de recuo frontal, essa redução chega a 77%, sendo a média da velocidade do vento por volta de 0,27 m/s. Se comparado com o caso base (caso 1), esse valor médio diminuiu 63% (Figura 20), o que sugere uma condição não satisfatória de ventilação natural. Como reflexo os valores de velocidade do vento internamente são ainda mais baixos, sendo a média em torno de 0,14 m/s, uma redução de 49% em relação ao caso 1, o que caracterizaria a ventilação natural para fins de conforto térmico como imperceptível.

No caso 4 percebe-se um comportamento semelhante ao caso 2, porém um pouco mais suave em termos de circulação e intensidade do fluxo (Figuras 17d e 18d). Diferente do caso 3, o desvio ascendente do fluxo em direção ao telhado é menor, na medida em que parte do escoamento incide através dos elementos vazados, o que possibilita maior abrangência do fluxo dentro do lote. Contudo, em comparação com os casos 1 e 2, percebe-se a formação de maiores zonas de turbulência e contornos de velocidade mais suaves no recuo frontal. Dentro da edificação, observa-se a incidência de vento através das aberturas a barlavento, a formação de algumas áreas de recirculação na sala/cozinha e nos quartos.

Figura 19 - Comportamento da velocidade média do vento ao longo do modelo e o rebatimento nos níveis de ventilação natural para o conforto térmico

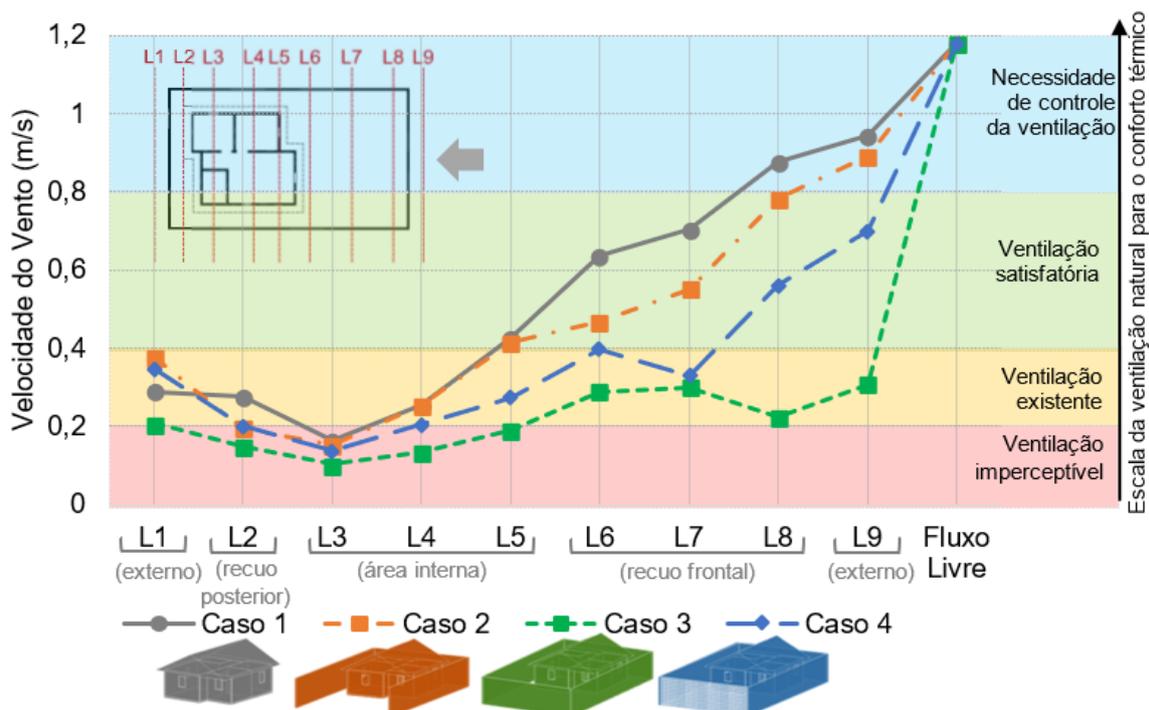
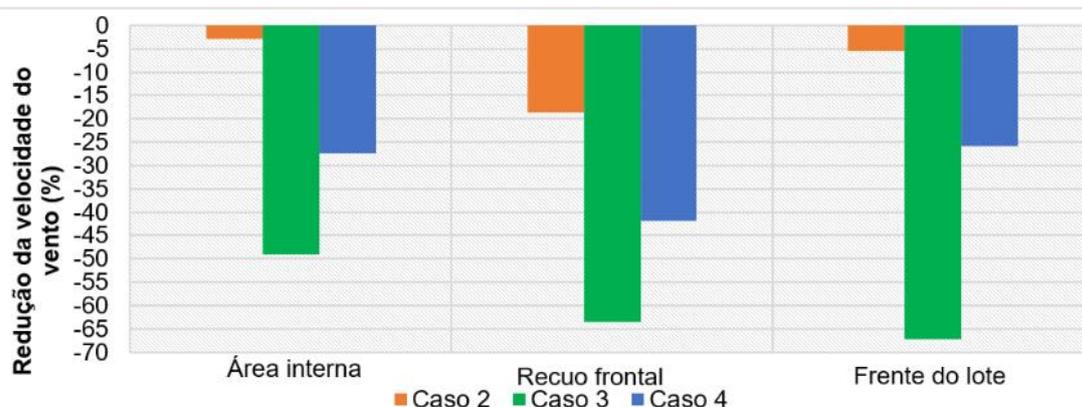


Figura 20 - Porcentagens de redução da velocidade média do vento dos casos 2, 3 e 4 em relação ao caso de referência (caso 1) nas diferentes regiões do modelo



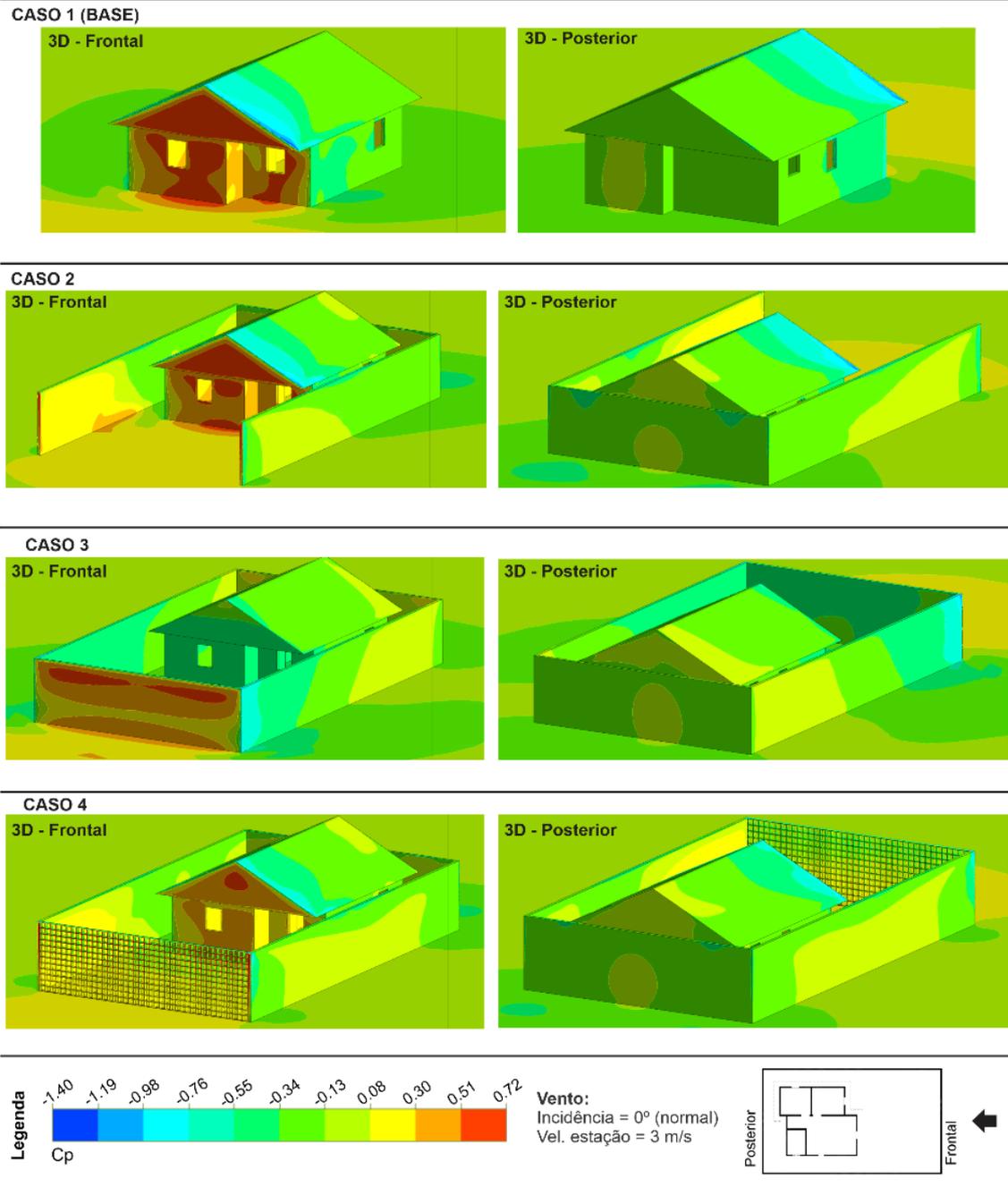
Em geral, é possível perceber que os valores médios de velocidade do vento para o caso 4 possuem uma tendência intermediária (Figura 19). Na região de recuo frontal, a média registrada é de 0,43 m/s, um valor considerado ainda satisfatório em termos de conforto térmico. Esse valor indica uma redução de 42% em comparação ao caso base (Figura 20). Nos ambientes internos, os valores médios ficam por volta de 0,20 m/s, representando uma redução de 27% em relação ao caso base. Em contrapartida, há um acréscimo de 42% em comparação ao caso 3. A ventilação natural dentro da edificação pode ser classificada como existente, porém muito próxima do limiar mínimo.

Coefficientes de pressão (Cps)

A distribuição dos coeficientes de pressão (Cps) no modelo se comportou de diferentes formas em cada caso. No caso 1, percebe-se que os Cps assumem valores positivos e mais altos na fachada a barlavento e se reduzem ao longo das fachadas laterais e posterior (sotavento), assumindo valores predominantemente negativos (Figura 21). Assim, as aberturas dos ambientes situados na fachada a barlavento (J1 e J2) possuem valores

positivos, funcionando como entrada de ar (Figura 22). Em contrapartida, as aberturas situadas nas fachadas laterais (J3, J4 e J5), que estão localizadas em regiões de zona de esteira, apresentaram valores negativos, o que sugere saída de ar. Destaca-se que as aberturas J1 e J3, situadas em um ambiente integrado (sala/cozinha), apresentaram maior diferença nos valores de C_p ($\Delta C_p = 0,62$), favorecendo a movimentação de ar no espaço, como visto na Figura 17a.

Figura 21 - Distribuição dos C_p s ao longo das fachadas do modelo



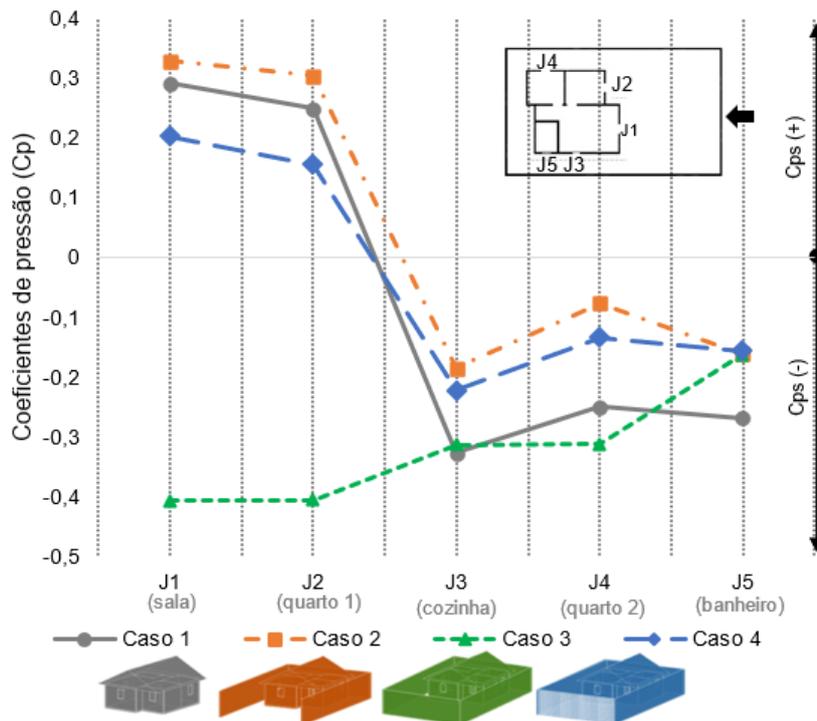
No geral, os casos 2 e 4 apresentaram padrões semelhantes ao caso 1, com a fachada a barlavento com pressões positivas e as demais tendendo a valores negativos (Figura 21). Contudo, os contornos ficaram mais suaves, indicando menores diferenciais de Cps ao longo do modelo. Ao observar a Figura 22, percebe-se que no caso 2 os valores de Cps nas aberturas a barlavento (J1 e J2) são levemente mais altos do que o caso 1, porém houve uma redução nos valores negativos das aberturas localizadas a sotavento (J3 e J4), reduzindo o ΔC_p . A redução dos diferenciais foi mais evidente no caso 4, em que tanto houve diminuição dos valores positivos de Cps das aberturas a barlavento (J1 e J2), como nos valores negativos das aberturas localizadas a sotavento (J3 e J4). O ΔC_p entre J1 (sala) e J3 (cozinha) ficou por volta de 0,43, uma diminuição de 31% em relação ao caso 1, o que influenciou na intensidade da velocidade do vento (Figura 17d).

A distribuição dos Cps no caso 3 foi o que mais destoou do caso 1, apresentando contornos de Cps predominantemente negativos e uniformes, não favorecendo a circulação do fluxo de vento (Figura 21). Na Figura 22, é possível identificar que as janelas a barlavento (J1 e J2) apresentaram valores mais baixos do que as janelas a sotavento (J3 e J4). Esse comportamento gerou o fluxo reverso, em que as aberturas destinadas à entrada de ar tornam-se aberturas de saída (Figura 18c).

Discussão

Este artigo demonstrou que a forma de delimitação do lote de casas populares, sem ou com fechamento, influenciou no comportamento da ventilação natural, sobretudo na distribuição dos Cps na envoltória da edificação, na circulação do fluxo e nos valores de velocidade do vento. Em geral, quanto mais fechado o lote, mais interferência houve nas condições do fluxo livre, visto que ocorreu uma redução dos diferenciais de Cp ($\Delta C_p \cong 0$), gerando um escoamento com mais áreas de recirculação, velocidades mais baixas e uniformes ao longo do modelo.

Figura 22 - Comparação entre os valores médios de Cps nas aberturas do modelo



Em sua maioria, os resultados encontrados estão em convergência com estudos correlatos. No caso base (caso 1), em que não há presença de muros, observaram-se valores mais altos de velocidade do vento e a ocorrência de ventilação cruzada mais acentuada do que nos outros casos, como já verificado em outros trabalhos (CHANG, 2006; CHANG; CHENG, 2009; HAWENDI; GAO, 2017; XAVIER; LUKIANTCHUKI, 2021). Hawendi e Gao (2017) argumentaram que altos valores de velocidade podem ter impacto no desconforto interno, devido à distribuição desigual do fluxo. Contudo, apesar de verificar esse fluxo desigual no modelo analisado, observou-se que velocidades maiores permitiram condições de ventilação natural mais próximas dos níveis satisfatórios para o conforto térmico, levando em consideração o contexto climático estudado (CÂNDIDO *et al.*, 2010).

No entanto, verifica-se que o modelo de edificação utilizado, já apresentava uma configuração desfavorável a ocorrência de ventilação cruzada. Com exceção do ambiente integrado, sala e cozinha, os outros cômodos possuem ventilação unilateral simples, e não há presença de aberturas na fachada posterior. Como consequência a circulação de ar não é abrangente em todos os ambientes internos e, diferente do observado no recuo frontal, os valores de velocidade do vento classificaram a ventilação natural como abaixo do nível satisfatório para o conforto térmico, segundo a escala de Morais (2013).

Observa-se que a intensidade dos efeitos promovidos pela incorporação dos muros nas condições de ventilação foi diretamente relacionada com nível de permeabilidade do muro frontal. Quanto mais fechado o muro frontal, mais distante ficaram os resultados em relação aos obtidos para o caso base. Considerando apenas o nível de permeabilidade do muro frontal, o caso 2, com 100% de porosidade, e o caso 4, com porosidade alta (> 50%), apresentaram comportamentos com tendência similar ao caso base, apesar dos valores mais baixos de velocidade e de ΔC_p .

Em contraste, o muro sólido do caso 3 (0% de permeabilidade) apresentou um comportamento diferente do caso base. Isso ocorreu em todos os aspectos analisados, sobretudo na uniformidade e inversão dos valores de C_p , que geraram o fluxo reverso nas aberturas a barlavento da edificação. Assim, é possível afirmar que o muro frontal totalmente fechado (caso 3) cria uma grande zona de esteira dentro do lote. Em climas frios, essa condição pode ser benéfica para proteção contra os efeitos do vento, contudo, em climas quentes, limita o potencial da ventilação natural em amenizar o desconforto térmico.

Em geral, esses padrões de comportamento também foram identificados nos estudos citados anteriormente, como os de Chang (2006), Chang e Cheng (2009) Hawendi e Gao (2017). Contudo, os resultados para o caso 2 divergiram dos dados obtidos no trabalho de Xavier e Lukiantchuki (2021). As autoras analisaram um cenário semelhante, ou seja, um modelo com muros sólidos nas laterais e na parte posterior, porém esse modelo apresentou um comportamento mais similar ao caso 3 (fechamento total do lote), com baixas velocidades e C_p s uniformes. Acredita-se que a diferença entre os resultados decorra das condições de vento e do modelo de edificação analisados em cada trabalho. Xavier e Lukiantchuki (2021) simularam considerando a direção predominante dos ventos, sendo o ângulo de incidência oblíquo à fachada frontal do modelo, o que difere da condição determinada no presente estudo, em que a incidência foi fixada normal (0°) a essa superfície. Ressalta-se que a influência do ângulo de incidência dos ventos é um fator pouco investigado na literatura.

Conclusões

Este artigo avaliou o comportamento da ventilação natural em um modelo de habitação térrea com diferentes cenários de fechamento das divisas do lote, com destaque para divisa frontal. Pode-se concluir que as condições de ventilação natural são influenciadas pelo tipo de delimitação do lote, pois cada configuração exerceu efeito sobre a distribuição dos C_p s na envoltória da edificação, alterando o padrão de circulação e os valores de velocidade do vento em relação ao fluxo livre.

Os resultados para o caso 1, em que a edificação foi analisada sem a interferência de muros, demonstraram que o modelo representativo de habitação de interesse social já apresentava limitações de projeto para o aproveitamento da ventilação natural, confirmando as fragilidades projetuais desse segmento habitacional em termos de conforto térmico. Contudo, é evidente que a incorporação de muros (casos 2, 3 e 4) prejudicou ainda mais as condições existentes.

A intensidade dos efeitos dos muros no comportamento dos ventos nas condições simuladas foi diretamente relacionada ao nível de permeabilidade do muro frontal. O fechamento total do lote (caso 3) ocasionou maior impacto nos diferenciais de C_p s e na redução dos valores de velocidade do vento, consequentemente foi o cenário que mais limitou o uso da ventilação natural.

Ressalta-se que os resultados do presente estudo se limitaram na comparação dos quatro cenários. Esse recorte evidenciou a influência da permeabilidade do lote, porém outros parâmetros foram fixados. Nesse sentido, para entender melhor o efeito dos muros em edifícios naturalmente ventilados, são sugeridas análises paramétricas com a variação de recuo, porosidade e altura do muro, bem como a análise de diferentes condições de vento.

Ao considerar a realidade das habitações brasileiras, onde é comum a utilização de muros fechados, a utilização de elementos vazados no muro frontal pode ser vantajosa. A incorporação desses elementos pode aliar a necessidade de delimitação do lote com menores impactos nas condições de ventilação natural.

Referências

- ANSYS. **Software ANSYS 2020 R2**. 2020. Disponível em: <http://www.ansys.com/>. Acesso em: 30 ago. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: edificações habitacionais: desempenho: parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2021.
- BAVARESCO, M. V. *et al.* Aspectos impactantes no desempenho energético de habitações de interesse social brasileiras: revisão de literatura. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 263–292, jan./mar. 2021.
- BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Introdução a ventilação natural**. 4. ed. rev. Maceió: EDUFAL, 2015.
- BLOCKEN, B. LES over RANS in building simulation for outdoor and indoor applications: a foregone conclusion? **Building Simulation**, v. 11, p. 821-870, 2018.
- BRACHT, M. K.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. A metamodel for building information modeling-building energy modeling integration in early design stage. **Automation in Construction**, v. 121, p. 103422, 2021.
- CÂNDIDO, C. *et al.* Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone. **Building and Environment**, v. 45, p. 222–229, 2010.
- CELIK, I. B. *et al.* Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. **Journal of Fluids Engineering**, v. 130, p. 1-4, 2008.
- CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Proposta de instrução normativa INMETRO para a classe de eficiência energética de edificações residenciais**. Florianópolis, 2018. Disponível em: <http://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/2018-09-25-INI-R%20-%20Vers%C3%A3o02.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- CHANG, W. R. Effect of porous hedge on cross ventilation of a residential building. **Building and Environment**, v. 41, n. 5, p. 549–556, 2006.
- CHANG, W. R.; CHENG, C. L. Modulation of cross ventilation in a residential building using a porous hedge. **Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers**, v. 30, n. 5, p. 409–417, 2009.
- CÓSTOLA, D.; ALUCCI, M. P. Aplicação de CFD para o cálculo de coeficientes de pressão externos nas aberturas de um edifício. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 1, p. 145-158, jan./mar. 2011.
- ELI, L. G. *et al.* Thermal performance of residential building with mixed-mode and passive cooling strategies: the Brazilian context. **Energy and Buildings**, v. 244, p. 111047, 2021.
- ETHERIDGE, D. A perspective on fifty years of natural ventilation research. **Building and Environment**, 91, p. 51–60, 2015.
- FRANKE, J. *et al.* Recommendations on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment. **Cost Action C**, v. 14, 2004.
- HAWENDI, S.; GAO, S. Impact of an external boundary wall on indoor flow field and natural cross-ventilation in an isolated family house using numerical simulations. **Journal of Building Engineering**, v. 10, p. 109–123, 2017.
- HEISLER, G.; DEWALLE, D. Effects of windbreak structure on wind flow. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 22–23, n. C, p. 41–69, 1988.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Dados históricos anuais (2011 – 2020)**. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 10 out. 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION. **ISO 7726**: ergonomics of the thermal environment instruments for measuring physical quantities. Genève, 1998.

KARAVA, P.; STATHOPOULOS, T.; ATHIENITIS, A. K. Airflow assessment in cross-ventilated buildings with operable façade elements. **Building and Environment**, v. 46, n. 1, p. 266–279, 2011.

KOWALTOWSKI, D. *et al.* Análise de parâmetros de implantação de conjuntos habitacionais de interesse social: ênfase nos aspectos de sustentabilidade ambiental e da qualidade de vida. In: SATTTLER, M. A.; PEREIRA, F. O. R. (org.). **Coleção Habitare**: construção e Meio Ambiente. Porto Alegre: ANTAC, 2006. v. 7, p. 128–167.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Arquivos climáticos INMET 2018**. Florianópolis, 2018. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2018>. Acesso em: 20 ago. 2021.

LACERDA, A. E.; MARROQUIM, F.; ANDRADE, S. Avaliação pós-ocupação de unidades habitacionais do conjunto Antônio Mariz, João Pessoa-PB. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DO PROJETO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2., Rio de Janeiro, 2011. **Anais [...]** Rio de Janeiro: ANTAC, 2011.

LEITE, R. C. V.; FROTA, A. B. Procedimentos para determinação de coeficientes de pressão em diferentes condições de adensamento urbano. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., Brasília, 2013. **Anais [...]** Brasília: ANTAC, 2013.

LI, W.; WANG, F.; BELL, S. Simulating the sheltering effects of windbreaks in urban outdoor open space. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 95, n. 7, p. 533–549, 2007.

LIGHT, E.; BAILEY, J.; LUCAS, R. Filling the Knowledge Gaps HVAC and COVID-19. **Ashrae Journal**, v. 62, n. 9, p. 20-28, 2020.

LOGSDON, L *et al.* O morador e a moradia: um estudo de caso no PMCMV em Cuiabá-MT. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., São Paulo, 2016. **Anais [...]** Porto Alegre: ANTAC, 2016.

LUKIANCHUKI, M. A. *et al.* Evaluation of CFD simulations with wind tunnel experiments: Pressure coefficients at openings in sawtooth building. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 40, p. 37537, 2018.

LUKIANCHUKI, M. A. **Sheds extratores e captadores de ar para indução da ventilação natural em edificações**. São Paulo, 2015. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

MARROQUIM, F. M. G. **Produção habitacional de Maceió-AL**: transformações espaciais da Habitação de Interesse Social de 1964 a 2014. Maceió, 2017. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo: Dinâmica do Espaço Habitado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017.

MORAIS, J. **Ventilação natural em edifícios multifamiliares do “Programa Minha Casa Minha Vida”**. Campinas, 2013. Tese (Doutorado em Arquitetura Tecnologia e Cidade) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

NASCIMENTO, M. de A. L. **A influência de diferentes configurações do peitoril ventilado na ventilação natural de habitação de interesse social**. Maceió, 2021. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2021.

NEOREX. **NEOREX80**: catálogo 2021.2 (completo). 2021. Disponível em: <https://www.neorex.com.br/downloads/>. Acesso em: 10 jan. 2022.

OLGYAY, V. **Arquitetura y clima**: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1998.

RAINE, J. K.; STEVENSON, D. C. Wind protection by model fences in a simulated atmospheric boundary layer. **Journal of Industrial Aerodynamics**, v. 2, p. 159–180, 1977.

RAMPONI, R.; BLOCKEN, B. CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters. **Building and Environment**, v. 53, p. 34–48, 2012.

ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES. **Rhinoceros 3D 7 for Windows**. Seattle, 2021. Disponível em: <https://www.rhino3d.com/>. Acesso em: 1º jul. 2021.

SAKIYAMA, N. R. M. *et al.* Perspectives of naturally ventilated buildings: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 130, p. 109933, mar. 2020.

SAKIYAMA, N. R. M. *et al.* Using CFD to evaluate natural ventilation through a 3D parametric modeling approach. **Energies**, v. 14, p. 2197, 2021.

SANTOS, D.; BARROS, B.; AMORIM, J. A. Reforma na habitação de interesse social: diagnóstico de um conjunto residencial do semiárido nordestino. In: ENCONTRO LATINOAMERICANO DE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 2013. **Anais [...]** Curitiba: UFPR, 2013.

SANTOS, P. O. C.; BATISTA, J. O.; SARMENTO, T. F. C. S. Reformas e percepção do ambiente térmico: estudo de caso em Maceió, AL. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Canela, 2022. **Anais [...]** Porto Alegre: ANTAC, 2022.

TRIANA, M. A.; DE VECCHI, R.; LAMBERTS, R. Building design for hot and humid climate in a changing world. In: ENTERIA, N.; AWBI, H.; SANTAMOURIS, M. (ed.). **Building in hot and humid regions**. Springer: Singapore, 2020.

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, p. 524–541, dez. 2015.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. 2. ed. England: Pearson Education Limited, 2007.

XAVIER, A. C. de A.; LUKIANTCHUKI, M. A. Análise da ventilação natural em uma habitação de interesse social, com diferentes configurações de muro, através de simulações CFD. **Risco Revista de Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo**, v. 19, p. 1-19, 2021.

Isabely Penina Cavalcanti da Costa

Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Administração do projeto, Validação de dados e experimentos, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Instituto Federal de Alagoas | Departamento de Arquitetura e Construção, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo | Universidade Estadual de Campinas | Rua Saturnino de Brito, 224, Cidade Universitária Zeferino Vaz | Campinas - SP - Brasil | CEP 13083-889 | Tel.: (19) 3521-2307 | E-mail: isabelypenina@gmail.com

Lucila Chebel Labaki

Conceitualização, Administração do projeto, Supervisão, Redação - revisão e edição.

Departamento de Arquitetura e Construção, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo | Universidade Estadual de Campinas | E-mail: lucila@fec.unicamp.br

Athos Lages

Pesquisa, Validação de dados e experimentos.

Engenharia de Simulação Computacional | Hexperts Inovação e Tecnologia | Rua Inácio de Souza Morais, 241, Piedade | Jabotão dos Guararapes - PE - Brasil | CEP 54410-130 | E-mail: athos.lages@gmail.com

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.