

Impacto de dispositivos de sombreamento na distribuição de pressão em um modelo genérico

Impact of shading devices on pressure distribution in a generic model

Michele Marta Rossi 

Karin Maria Soares Chvatal 

Alessandra Rodrigues Prata-Shimomura 

Fernando Vitor Marques da Silva 

Resumo

A ventilação natural é uma importante estratégia passiva para manutenção da qualidade do ar e do conforto térmico em espaços internos. O diferencial de pressão nas fachadas das edificações, quantificado a partir dos coeficientes de pressão (Cps), impacta diretamente no desempenho da ventilação natural. Fatores como direção do vento, entorno, tipo de terreno, geometria da edificação e detalhamentos nas fachadas influenciam a distribuição de pressão. Muitas investigações utilizam-se de ensaios em túneis de vento ou simulações fluidodinâmicas para avaliar os Cps em geometrias lisas e regulares. Neste artigo, objetiva-se avaliar o impacto de dispositivos de sombreamento externos nos Cps em um modelo genérico isolado de 3,0 m x 3,0 m x 2,7 m com duas aberturas (de 1 m² cada uma) centralizadas e dispostas em faces opostas a 1,1 m do piso. Assim, a partir de sua versão reduzida (escala 1:7,5), cinco configurações (sem dispositivos, modelo selado e com aberturas e tipologias com sombreamentos horizontal, combinados e verticais) foram ensaiadas em túnel de vento para oito incidências de vento (de 0° a 90° e 180°). Os resultados indicaram maiores discrepâncias nos Cps nas tipologias com componentes verticais expostas às incidências de 45°, 60° e 75°.

Palavras-chave: Ventilação natural. Coeficiente de pressão (Cp). Túnel de vento. Dispositivos de sombreamento.

Abstract

Natural ventilation in buildings is an important passive strategy to maintain indoor air quality and comfortable thermal environments. The pressure differential on buildings' façades, quantified by the wind pressure coefficients (WPCs), directly impacts the performance of natural ventilation. Several factors, as wind direction, surroundings, terrain type, building geometry and façades' details influence wind pressure distribution. Many investigations use wind tunnel tests or computational fluid dynamics simulations to evaluate the Cps in regular geometries. This paper aims to evaluate the impact of external shading devices on the WPCs of a generic isolated model with 3.0 m x 3.0 m x 2.7 m with two openings (with 1.0 m² each), centralised and placed on opposite façades with a windowsill measuring 1.1 m. Thus, from its reduced version (scale 1:7.5), five configurations (model without shadings, sealed model and model with openings, and typologies with horizontal, combined and vertical shading devices) are tested in a wind tunnel with eight wind attack angles (0° to 90° and 180°). The results show greater differences in cases with vertical shading devices exposed to wind attack angles of 45°, 60° and 75°.

Keywords: Natural ventilation. Wind pressure coefficient (WPC). Wind tunnel. Shading device.

¹Michele Marta Rossi

¹Universidade Federal do Piauí
Teresina - PI - Brasil

²Karin Maria Soares Chvatal

²Universidade de São Paulo
São Carlos - SP - Brasil

³Alessandra Rodrigues Prata-Shimomura

³Universidade de São Paulo
São Paulo - SP - Brasil

⁴Fernando Vitor Marques da Silva

⁴Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa - Portugal

Recebido em 14/12/21

Aceito em 24/02/22

Introdução

A ventilação natural em edificações consiste no fluxo de ar entre ambientes internos e externos decorrentes de diferenciais de pressão induzidos por ação eólica, térmica ou combinada. Essa estratégia apresenta como principais funcionalidades a manutenção da qualidade do ar interno, que deve ser assegurada em quaisquer circunstâncias; o conforto térmico, principalmente em clima quente e úmido, e o arrefecimento das estruturas da edificação (GIVONI, 1976; LIDDAMENT, 1996; ALLARD, 2002; SANTAMOURIS; WOUTERS, 2006). Frente ao contexto atual, de pandemia sanitária, adiciona-se o seu potencial em auxiliar na redução da transmissão de agentes patogênicos por vias aéreas, sendo, portanto, a ventilação natural dos ambientes internos citada entre as recomendações de combate à Covid-19 (MELIKOV, 2020). Ademais, essa estratégia gratuita e de grande alcance social (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2008) é indicada em sete das oito zonas bioclimáticas brasileiras para o condicionamento térmico passivo de ambientes no verão (ABNT, 2005).

Em clima quente e úmido, característico de grande parte do território brasileiro, o uso conjugado de estratégias de ventilação natural e de sombreamento das aberturas pode representar uma alternativa válida para a redução do condicionamento artificial, do consumo energético, além de auxiliar nos níveis de conforto térmico nos ambientes (CÂNDIDO *et al.*, 2010). No entanto, a prática de integrar aspectos de conforto ambiental no processo projetual ainda esbarra na limitação dos meios de representação gráfica (do desenho), na complexidade inerente aos fenômenos físicos ou na interpretação e confiabilidade, por parte dos projetistas, da efetividade dessas alternativas passivas quando comparadas às estratégias mecânicas e/ou híbridas tecnológicas na garantia do conforto térmico (KOWALTOWSKI *et al.*, 2005; TRINDADE; PEDRINI; DUARTE, 2010).

Quando se trata da ventilação natural, o deslocamento do ar é frequentemente representado por flechas que não expressam seu real comportamento (KOWALTOWSKI *et al.*, 1998). Dessa forma, estimativas mais precisas acerca do fluxo de ar podem ser obtidas a partir de modelos numéricos ou teóricos que demandam, dentre seus principais dados de entrada, os valores dos coeficientes de pressão devido ao vento, denominados de Cps. De acordo com Toledo (1999), o C_p é um quociente adimensional que relaciona a pressão dinâmica em um dado ponto da superfície da edificação à pressão dinâmica do fluxo de ar não perturbado. Segundo Cóstola, Blocken e Hensen (2009), a sua obtenção pode ocorrer por meio de fontes primárias (aferições em escala real, ensaios de modelos reduzidos em túneis de vento e simulações fluidodinâmicas, as chamadas *Computational Fluid Dynamics*, CFD) ou por fontes secundárias, ou seja, banco de dados e modelos teóricos, tais como AIVC; ASHRAE; CpCal+; *Swami and Chandra model*; *CpGenerator*. No entanto, usualmente, esses dados disponibilizados por fontes secundárias ou na literatura científica especializada (LIDDAMENT, 1996; MARQUES DA SILVA, 2004) fazem referência a geometrias regulares (paralelepípedos) e lisas (sem detalhamentos nas fachadas).

O banco de dados desenvolvido pela Universidade de Tóquio, *TPU Aerodynamics Database* (TOKYO..., 2021), contempla uma extensa quantidade de Cps para edificações baixas e altas, com presença ou não de entorno, beirais e diferentes tipos de telhados para exemplares com variadas proporções geométricas. Outra recente alternativa para a obtenção de Cps é o *CpSimulator* (CP SIMULATOR, 2019) que permite a partir de cálculos, baseados em *Computational Fluid Dynamics*, designar os valores dessa variável para a geometria que se deseja analisar. De acordo com Bre e Gimenez (2022), os modelos que contemplam detalhamentos nas fachadas foram validados a partir de exemplares disponíveis na TPU ou com sacadas (CHAND; BHARGAVA; KRISHAK, 1998; MONTAZERI; BLOCKEN, 2013).

Para avaliações numéricas do desempenho termoenergético de edificações, os programas nomeados de *Building Energy Simulation* (BES) também requisitam os Cps como parâmetros de entrada para análise da ventilação natural, dando ao usuário as opções de incluí-los manualmente ou utilizar-se, para geometrias retangulares, do seu cálculo automático, em que os Cps são determinados por algoritmos internos ao programa e consistem em valores médios de pressão por fachada. De acordo com Cóstola *et al.* (2010), esses programas apresentam bancos de dados de Cps limitados a geometrias simples como cubos e paralelepípedos. O *EnergyPlus* (DEPARTMENT..., 2021), por exemplo, utiliza-se do modelo de Swami e Chandra (1988) para edificações baixas, e, para as altas, equações de dados providas da normativa americana *ASHRAE Fundamentals Handbook*, desenvolvidos por Atkins, Peterka e Cermak (1979) e Holmes (1986). No entanto, independentemente do tipo de edificação, a documentação do programa enfatiza que impactos provenientes de dispositivos de sombreamento são desconsiderados nos cálculos de ventilação natural: “It is assumed that the air flow through a window opening is unaffected by the presence of a shading device such as a shade or blind on the window [...]” (DEPARTMENT..., 2021, p. 1100).

De acordo com Allard (2002), qualquer anteparo externo ou interno pode ser um obstáculo ao fluxo de ar e em edificações naturalmente ventiladas os dispositivos de sombreamento devem cumprir sua função de proteger da insolação indesejada e ainda permitir ventilação suficiente. Contudo, ainda que a distribuição de pressão nas envoltórias das edificações seja determinante para o potencial de ventilação natural, as investigações científicas majoritariamente referem-se ao impacto dos detalhamentos nas fachadas das edificações, tais como dispositivos de sombreamento (CHAND; KRISHAK, 1971; BITTENCOURT; BIANA; CRUZ, 1995; PRIANTO; DEPECKER, 2002; HILDEBRAND, 2011; VETTORAZZI *et al.*, 2016; CASTAÑO, 2017; QUADROS; ORDENES, 2017; MACIEL *et al.*, 2017; MATHAN KANNAN; NAGARAJAN; DHANALAKSHMI, 2018) e sacadas (STATHOPOULOS; ZHU, 1988; CHAND, BHARGAVA; KRISHAK, 1998; ROFAIL; KWOK, 1999; KOTANI; YAMANAKA, 2007; LOCHE *et al.*, 2020) ocasionados no seu desempenho (térmico e/ou lumínico, por exemplo), eficiência energética ou na velocidade média ou na distribuição do fluxo de ar verificada nos ambientes internos como apontado por Kiritmat *et al.* (2016).

Dessa forma, este artigo objetivou avaliar o impacto do uso de dispositivos de sombreamento na distribuição de pressão em um modelo genérico para vários ângulos de incidência por meio de ensaios em túnel de vento. Esse tipo de resultado pode ser útil não apenas à comunidade acadêmica, mas também aos profissionais projetistas e pesquisadores envolvidos com simulação termodinâmica.

Método

O procedimento metodológico é dividido em duas etapas:

- (a) descrição do modelo genérico; e
- (b) ensaios no túnel de vento.

Descrição do modelo genérico

O modelo genérico é caracterizado por uma geometria paralelepipedal e com área equivalente a um ambiente de maior permanência, como por exemplo dormitórios, em edificações residenciais brasileiras, especialmente habitações de interesse social. A definição de suas características, assim como das condições de contorno para as avaliações experimentais, visou minimizar os efeitos de parâmetros adicionais no desempenho da ventilação natural, priorizar a análise acerca do impacto dos dispositivos de sombreamento e assegurar os critérios de semelhança (geométrica, cinemática e dinâmica). Dessa forma, o procedimento metodológico englobou três classes de parâmetros.

Classe I: Geometria: características quanto ao modelo (dimensões), às aberturas (quantidade, tamanho e posicionamento nas fachadas) e à altura em que o modelo seria ensaiado, ou seja, se seria um exemplar térreo ou multipavimentos.

As dimensões do modelo genérico foram definidas a partir de três bases de informação:

- (a) modelos utilizados em exemplares da literatura científica para embasar análises experimentais (EVOLA; POPOV, 2006; MERONEY, 2009; KARAVA; STATHOPOULOS; ATHIENITIS, 2011, entre outros);
- (b) projetos residenciais (ROSSI, 2016; ANCHIETA, 2016; FAVRETTO, 2016); e
- (c) saletas comerciais (SANTESSO, 2017; NEVES *et al.*, 2017).

Já a quantidade, o tamanho e o posicionamento de aberturas buscaram representar uma situação de ventilação cruzada além de tentar capturar o máximo diferencial de pressão entre as aberturas (LECHNER, 2009; MARQUES DA SILVA, 2010; GIVONI, 1976). A opção por modelo térreo visou minimizar a complexidade da avaliação e a influência de parâmetros adicionais. Ademais, a investigação do impacto de detalhamentos nas fachadas de edificações altas na distribuição de pressão, como por exemplo sacadas, já tem sido enfoque de estudos numéricos e experimentais pela literatura científica (HIEN; ISTIADJI, 2003; AI *et al.*, 2011; MONTAZERI; BLOCKEN, 2013; LOCHE *et al.*, 2020).

Classe II: Dispositivos de sombreamento: tipologias dos dispositivos de sombreamento, as dimensões e posicionamento em relação à abertura.

Três tipologias comumente apresentadas aos estudantes de arquitetura e urbanismo durante o ensino de geometria da insolação e dimensionamento de protetores solares foram adotadas, por serem formas de simples execução e fácil aplicabilidade em projetos arquitetônicos. A profundidade desses elementos foi

definida por meio de análises qualitativas (ensaios em mesa d'água e elaboração de máscaras de sombra para diferentes latitudes que caracterizam o território brasileiro).

Classe III: Condições de contorno: o tipo de terreno, o grau de exposição e os ângulos de incidência de vento.

Definiu-se que o modelo genérico seria avaliado de forma isolada (sem consideração de entorno) e, inicialmente, em um terreno de baixa rugosidade (equivalente a uma área aberta) e de orografia plana. No entanto, essa configuração da rugosidade poderia ser ajustada diante da definição do perfil de camada limite atmosférica (CLA) no túnel de vento. Devido à simetria do modelo, a faixa de ângulos de incidência de vento foi fixada de 0° a 90°, com intervalos de 15°. A situação de 180° foi englobada para caracterizar uma situação em que o dispositivo se encontrasse na abertura sota-vento.

O Quadro 1 apresenta os 14 parâmetros determinados e seus respectivos valores. Informações mais detalhadas sobre o processo de definição do modelo genérico e a justificativa dos valores adotados para cada parâmetro podem ser verificadas em Rossi *et al.* (2018).

Ensaios no túnel de vento

As avaliações experimentais foram realizadas no túnel de vento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). O túnel de vento do IPT (Figura 1a) apresenta área de seção transversal de ensaio de 6 m² e 28 m de comprimento. A área de obstrução do modelo reduzido (na escala de 1:7,5) (Figura 1b) respeitou a indicada pela literatura científica, sendo inferior a 5% da área da seção transversal de ensaio (TOLEDO, 1999). Cinco configurações foram ensaiadas para oito incidências de vento (0° a 90°, com intervalos de 15° e 180°). Devido à elaboração de encaixes (do tipo macho e fêmea) nas peças das aberturas foi possível que um único modelo físico viabilizasse os ensaios de todas as tipologias avaliadas (Figura 1c).

Dois subgrupos tipológicos caracterizaram a matriz de ensaios: G1: Referências e G2: Características. O primeiro englobou as referências para a determinação do impacto, ou seja, as tipologias sem dispositivos de sombreamento, sendo a G1A o modelo genérico selado, e a G1B o modelo genérico com aberturas. Já o segundo subgrupo caracterizou as tipologias com sombreamentos: G2A (dispositivo de sombreamento horizontal); G2B (combinados) e G2C (verticais), e foram ensaiados na configuração com aberturas (Fonte: Rossi (2021).

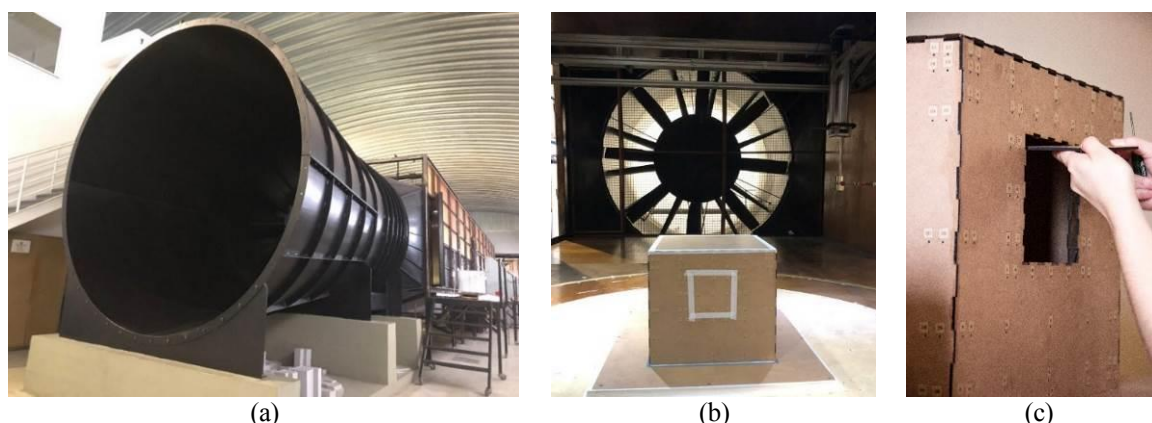
Figura 2).

Quadro 1 - Classes e parâmetros que caracterizaram a definição do modelo genérico

CLASSES	PARÂMETROS	VALORES
I. Geometria	Dimensões do modelo	3,0 m (face) x 3,0 m (face) x 2,7 m (altura)
	Quantidade de janelas	Duas aberturas (dispostas em faces opostas) / orientação-base (barlavento e sota-vento)
	Posicionamento das aberturas	Centralizadas na largura das faces
	Relação entre as aberturas de entrada e saída de ar	Mesma área
	Tamanho das aberturas	1,0 m x 1,0 m
	Formato das aberturas	Quadradas
	Peitoril da abertura	1,1 m
	Altura em que o modelo será avaliado	Térreo
II. Dispositivos de sombreamento	Tipologia	Horizontal (G2A), combinado (G2B), verticais (G2C)
	Posicionamento em relação às aberturas	Posicionados no limiar das aberturas
	Dimensões (comprimento e profundidade)	0,5 m de profundidade
III. Condições de contorno	Exposição	Isolado
	Rugosidade	Área aberta e de baixa rugosidade
	Ângulos de incidência do vento	0° - 90° (intervalos de 15°) e 180°

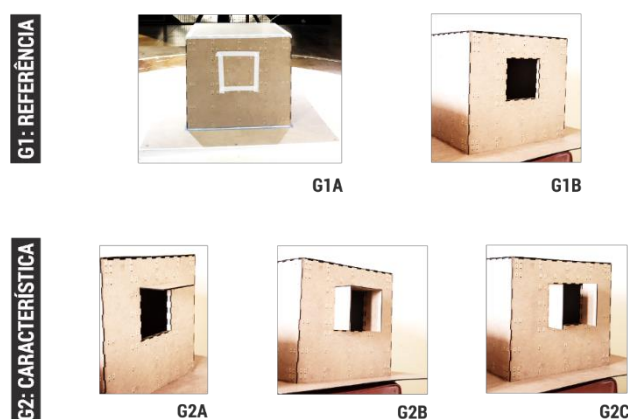
Fonte: adaptado de Rossi *et al.* (2018).

Figura 1 - (a) Túnel de vento do IPT; (b) Modelo reduzido; e (c) Encaixes dos dispositivos de sombreamento na abertura barlavento



Fonte: Rossi (2021).

Figura 2 - Tipologias da matriz de ensaios no túnel de vento do IPT



Fonte: Rossi (2021).

No total, 253 tomadas de pressão foram distribuídas pelas faces do modelo genérico (Figura 3), sendo estas de maior número nas regiões de interesse, ou seja, no entorno imediato de suas aberturas ou em regiões de mudança de comportamento do escoamento, como, por exemplo, nas suas arestas. A Figura 3 ilustra por meio da tipologia G1A (modelo genérico selado) o mapeamento completo das tomadas de pressão. Esse mapeamento foi idêntico para todas as avaliações, com exceção das tipologias em modelo genérico com aberturas em que as tomadas situadas nos vãos foram desconsideradas.

O perfil de camada limite atmosférica (CLA) foi gerado com auxílio de elementos de rugosidade (80 mm de altura, 80 mm de largura e 20 mm de espessura dispostos a montante do modelo), com barreira castelada e com geradores de vórtices (*spires*), resultando em um $\alpha = 0,29$ (Figuras 4a e 4b).

Transdutores de pressão multicanal da *Pressure System* permitiram a aferição simultânea das pressões nas tomadas distribuídas nas superfícies do modelo. O tempo de medição para cada ângulo de incidência do vento foi de 60 segundos à frequência de 250 Hz. A conexão desses módulos a uma placa de aquisição de dados em um computador viabilizou o conhecimento dos dados de pressão em cada tomada nos diversos cenários analisados.

Esses dados foram pós-processados a partir das Equações 1 e 2 em coeficientes de pressão (C_p s). A altura de referência para a determinação desses dados foi de 0,40 m na escala do modelo, o equivalente a 3,0 m na escala do protótipo. Justifica-se esse incremento na altura de referência, devido à necessidade de apoio do modelo a um sistema de suporte durante a realização dos ensaios, a fim de reforçar a sua estabilidade.

$$\overline{C_p} = \frac{1}{q_{ref}} \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^T (p(t) - P_0) dt \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

$\overline{C_p}$ = coeficiente de pressão médio (adimensional);

T = tempo de aquisição de dados (s);

p = pressão instantânea (Pa);

P_0 = pressão estática de referência (Pa);

q_{ref} = pressão dinâmica de referência (Pa);

t = instante de tempo; e

dt = diferencial.

A pressão dinâmica de referência foi calculada por meio da Equação 2:

$$q_{ref} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{ref}^2 \tag{Eq. 2}$$

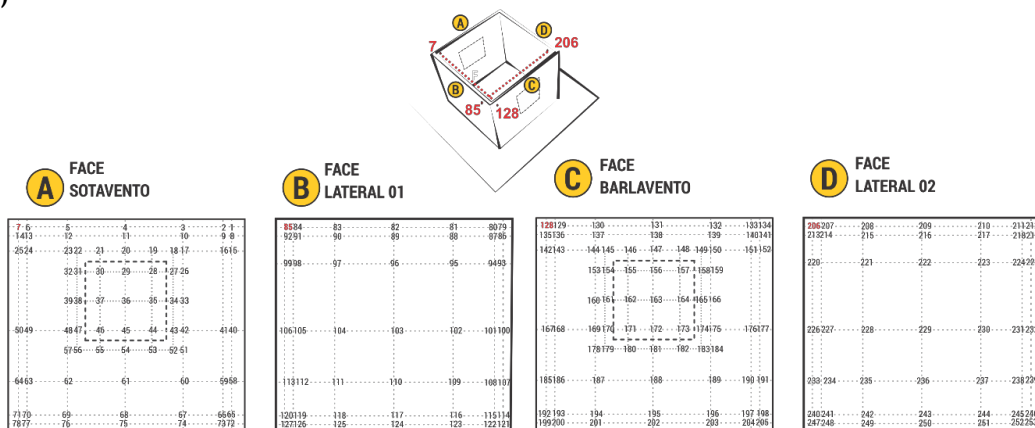
Onde:

q_{ref} = pressão dinâmica de referência (Pa);

ρ = massa volúmica do ar (kg/m^3); e

V_{ref} = velocidade correspondente à altura de referência (topo de cobertura do modelo) (m/s).

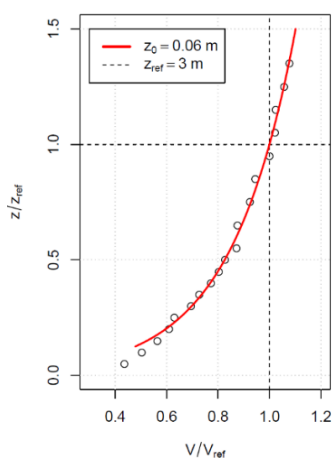
Figura 3 - Mapeamento das tomadas de pressão nas superfícies externas do modelo genérico selado (G1A)



*As representações das faces foram elaboradas de modo que a correspondência entre as tomadas de pressão localizadas em faces opostas fosse direta.

Fonte: Rossi (2021).

Figura 4 - (a) Perfil de velocidades da CLA utilizada nos ensaios; e (b) elementos de rugosidade para auxiliar a formação do perfil de CLA



(a)



(b)

Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2018) e Rossi (2021).

A partir dos dados de Cps, foram elaborados para todos os cenários avaliados gráficos de contorno para as faces barlavento e sota-vento.

Na sequência, diferenciais de pressão médios (ΔC_p médio) foram calculados para as mesmas situações, a partir da diferença dos Cps médios das faces barlavento e sota-vento ($\Delta C_{pm} = C_{pm} \text{ barlavento} - C_{pm} \text{ sota-vento}$), a fim de quantificar o impacto dos dispositivos de sombreamento nesse parâmetro que é dado de entrada para o cálculo de vazão de ar nos ambientes como indicado pela Equação 3:

$$G = C_d A U_\infty \sqrt{\Delta C_p} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

G: taxa de vazão de ar (m³/s);

C_d: coeficiente de descarga (adimensional);

A: área equivalente de abertura (m²);

U_∞ velocidade média de referência (m/s); e

ΔC_p = diferencial de pressão (adimensional).

Resultados

O impacto da adoção de diferentes tipologias de dispositivos de sombreamento em um modelo genérico exposto a variadas incidências de vento foi avaliado a partir do confronto dos dados das tipologias com sombreamento com os da de referência (modelos selado e com aberturas, G1A e G1B, respectivamente). As variáveis observadas foram:

- a distribuição de pressão nas quatro faces do modelo genérico;
- a distribuição de pressão nas faces barlavento e sota-vento, e no diferencial de pressão médio ($\Delta C_{pm} = C_{pm} \text{ barlavento} - C_{pm} \text{ sota-vento}$); e
- a diferença entre os diferenciais de pressão locais ($Dif = \Delta C_p \text{ local com sombreamento} - \Delta C_p \text{ local referência}$).

Distribuição de pressão nas quatro faces do modelo genérico

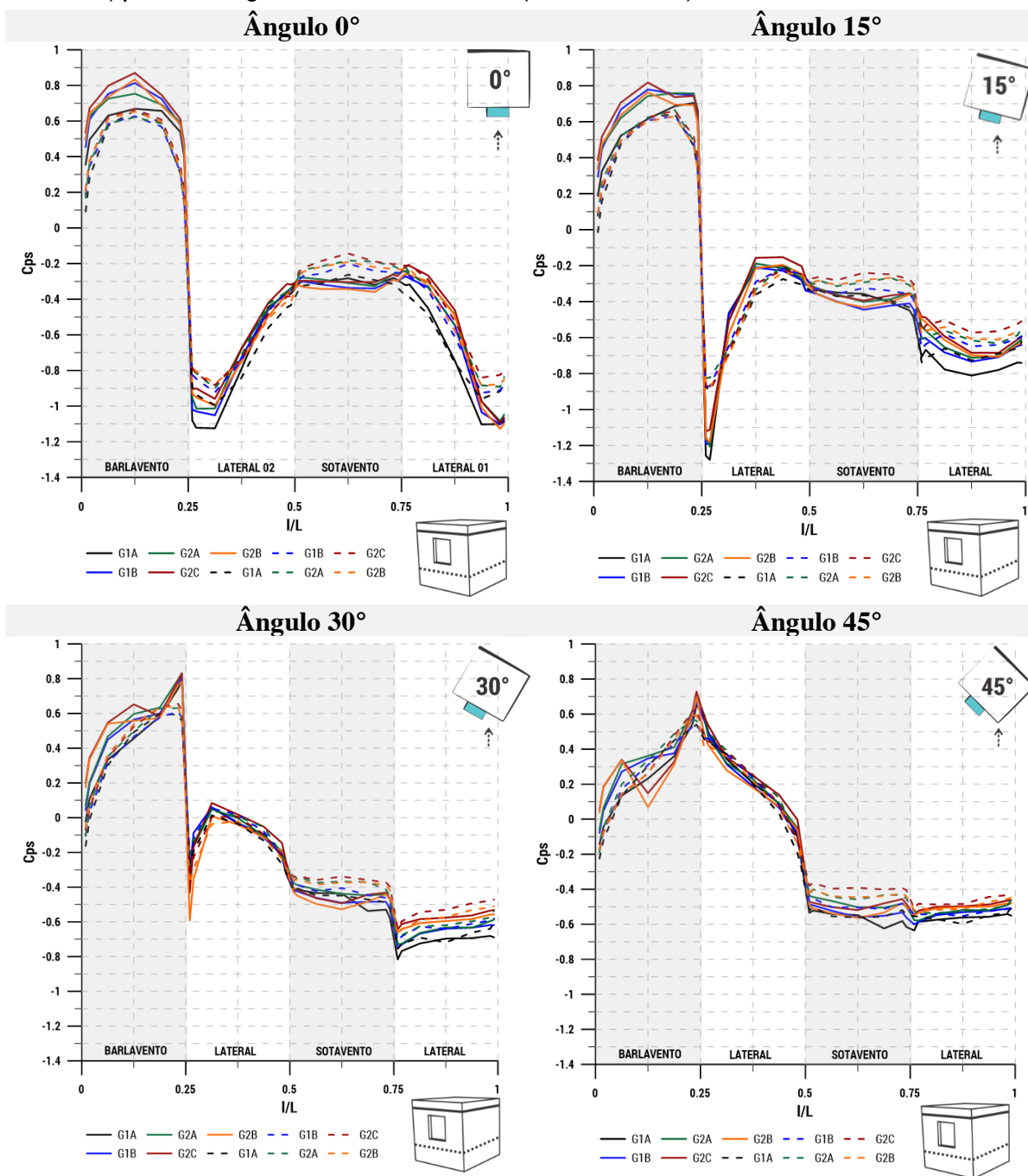
Primeiramente, a distribuição de pressão ao longo das quatro faces do modelo genérico avaliado nas diferentes configurações (tipologias e ângulos de incidência de vento) foi observada a partir de gráficos de linhas que correlacionaram os valores de Cps ao longo de dois perímetros (L) (Figuras 5 e 6).

No perímetro superior (localizado a aproximadamente 92% da altura da geometria), os valores de Cps foram plotados em linhas sólidas, já os Cps situados no perímetro inferior (localizado a cerca de 24% da altura da geometria) foram representados graficamente por linhas tracejadas. Esses perímetros percorrem as faces do modelo no sentido anti-horário, ou seja, os primeiros valores apresentados condizem à face barlavento, seguido dos dados correspondentes à lateral 02, face sota-vento e lateral 01.

É importante esclarecer que as nomenclaturas, barlavento e sota-vento utilizadas durante toda a análise de resultados, remetem à situação da geometria exposta ao escoamento incidindo a 0°, em que a abertura de entrada assim como os dispositivos de sombreamento (quando avaliados) encontram-se a barlavento, e a abertura oposta a sota-vento. Nas demais incidências, embora mantidas as nomenclaturas, indicam a rotação desta primeira situação em relação ao escoamento. Assim, a situação de 15° significa que a face (inicialmente) a barlavento encontra-se a 15° (no sentido horário) em relação ao escoamento. Nas Figuras 5 e 6 a vista superior do modelo é apresentada na lateral superior de cada gráfico, ilustrando o ângulo de incidência de vento considerado. A perspectiva do modelo no canto inferior direito demarca o posicionamento dos perímetros (superior e inferior). A indicação da localização do dispositivo de sombreamento quando existentes (tipologias G2A, G2B e G2C) é representada pela forma azul, sendo a outra abertura posicionada em face oposta, e sem a presença de sombreamento.

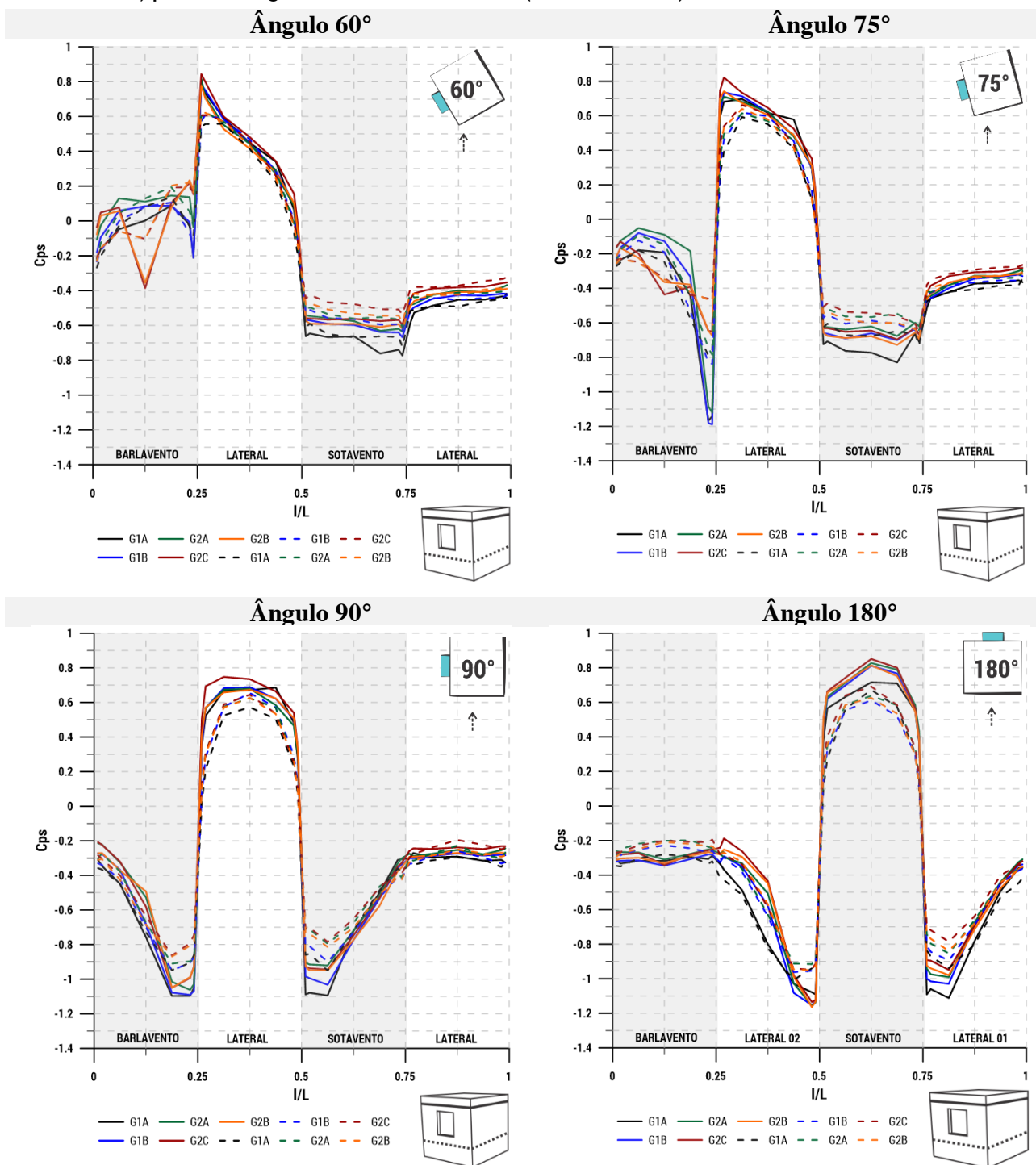
Em situações de ação dos ventos, a variação de pressão nas faces da edificação é função da força mecânica do vento e da transformação da energia cinética em pressão estática (RIVERO, 1985). O vento ao encontrar a edificação tende a contorná-la em busca de retomar o seu comportamento inicial, caracterizando zonas de sobrepressão nas faces expostas ao vento (barlavento) e de subpressão nas demais (laterais e sota-vento). Em formas não aerodinâmicas, como a grande parte das edificações, zonas de separação do escoamento são observadas, principalmente, nas suas arestas e esteiras de vento são geradas a jusante desses pontos.

Figura 5 - Distribuição de Cps ao longo de dois perímetros (superior - linha sólida e inferior - linha tracejada) nas diferentes tipologias (G1A - preto; G1B - azul; G2A - verde; G2B - laranja e G2C - vermelho) para cada ângulo de incidência de vento (0° a 90° e 180°)



Fonte: Rossi (2021).

Figura 6 - Distribuição de Cps ao longo de dois perímetros (superior - linha sólida e inferior - linha tracejada) nas diferentes tipologias (G1A - preto; G1B - azul; G2A - verde; G2B - laranja e G2C - vermelho) para cada ângulo de incidência de vento (0° a 90° e 180°)



Fonte: Rossi (2021).

A partir dos gráficos apresentados nas Figuras 5 e 6, verificou-se que para as faces laterais (01 e 02) poucas divergências foram observadas entre as tipologias ensaiadas, para cada ângulo de incidência de vento. No geral, maiores variações nos valores de Cps foram observadas na parte inferior da geometria (tomadas de pressão localizadas no perímetro inferior) e, principalmente, em situações de incidências mais oblíquas. Esse padrão é decorrente da ação da camada limite e das diferentes configurações das zonas de separação e das esteiras de vento ocasionadas pelas próprias arestas do modelo ao facear o escoamento. Nos ângulos de

incidência de 15° e 30°, variações nos perímetros da lateral 01 são justificadas pela ação conjunta, na conformação da esteira, da adoção dos dispositivos e da inclinação da geometria em relação ao escoamento. Já nos ângulos de 60° e 75°, observa-se maior discrepância entre as tipologias avaliadas em modelo com aberturas (G1B, G2A, G2B e G2C) e ao modelo selado (G1A).

Em síntese, o impacto da inclusão dos dispositivos de sombreamento, independente da referência analisada (modelo genérico com aberturas ou selado), foi mais expressivo nas faces barlavento e sota-vento em todos os cenários avaliados, por esse motivo optou-se por analisar o comportamento detalhado da distribuição de pressão dessas faces na seção subsequente, a partir de gráficos de contorno.

Impacto dos dispositivos de sombreamento externos na distribuição (C_p) e no diferencial de pressão (ΔC_p médio)

O impacto da adoção dos dispositivos de sombreamento na distribuição de pressão para os diversos cenários avaliados foi analisado por meio de gráficos de contorno das faces barlavento (B) e sota-vento (S) elaborados a partir das coordenadas das tomadas de pressão e dos valores de pressão correspondentes. Os valores de C_p s foram representados nessas faces, de acordo com o mapeamento apresentado na Figura 3, seguindo uma escala de cores de vermelho (C_p s iguais a 1,0) a roxo (C_p s entre -1,2 a -1,4). Os gráficos para todos os cenários (tipologias e ângulos de incidência do vento) avaliados foram apresentados na Figura 7.

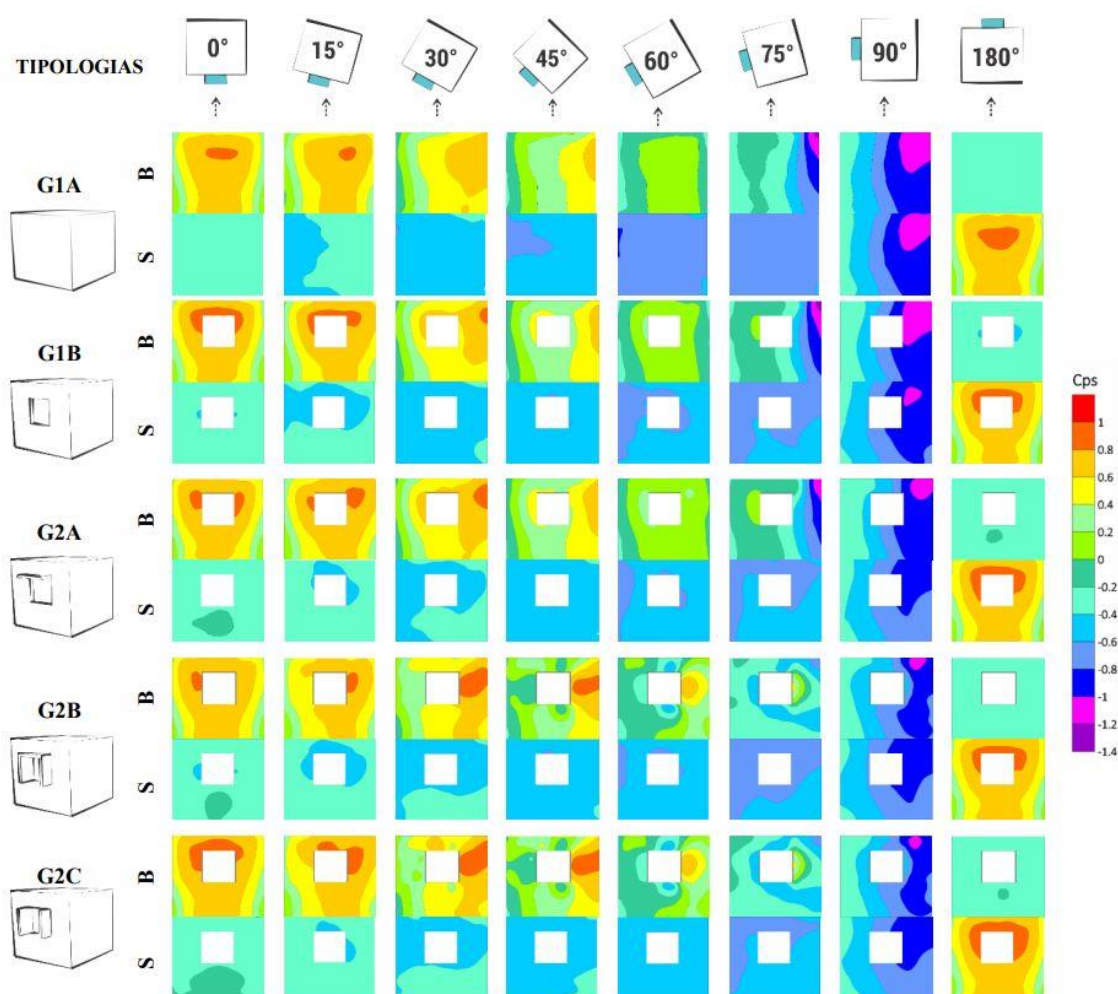
Para o ângulo de incidência de 0°, a tipologia selada (G1A) apresenta uma distribuição de pressão em concordância com a literatura científica para geometrias semelhantes. Em escoamentos considerando a camada limite atmosférica (CLA), a velocidade média varia com o incremento da altura. Por essa razão, de acordo com Aynsley, Melbourne e Vickery (1977), a zona de estagnação, ou seja, região de pressão máxima (C_p s da ordem de 0,8 a 1,0) situa-se aproximadamente a 80% da altura da face. Nessa zona, o escoamento se reparte e, em parte, migra (tangente à superfície) em direção às quinas da geometria ganhando velocidade e reduzindo as pressões e, em parte, resulta em um componente descendente na parte inferior, denominado de vórtice de pé de fachada. Assim, os C_p s variam na face a barlavento selada de 0,6 a 1,0 na região central e de 0,4 a 0 nas proximidades das arestas.

A inserção de aberturas, com áreas equivalentes a 1 m² cada uma no protótipo, em faces opostas, caracteriza a geometria G1B (modelo genérico com aberturas), resultando em uma expansão da área de estagnação em relação à G1A na face a barlavento. Nessa mesma fachada, ao adicionar um dispositivo de sombreamento horizontal (G2A), ocorre uma separação do escoamento e, conseqüentemente, a redução dos valores de C_p s logo acima da abertura, transpondo-os da faixa de 0,8 a 1,0 para o intervalo anterior (C_p s de 0,6 a 0,8). A tipologia G2B, ao combinar elementos verticais e horizontal em sua composição, introduz maior quantidade de pontos de separação ao escoamento, reduzindo assim a área da zona de estagnação em relação ao modelo selado. Já a geometria G2C tem a sua distribuição de pressão semelhante à G1B. De modo geral, nota-se pouca influência dos dispositivos de sombreamento na distribuição de pressão para essa orientação, com diferenciais médios calculados para as tipologias com sombreamento variando na ordem de 0% a -3% em relação às referências (G1A e G1B) (Tabela 1).

Para as incidências de 15° e 30°, devido à disposição em ângulo do modelo em relação ao escoamento, ocorreu a inclinação e perda de simetria dos contornos em todas as tipologias, além da redução da zona de estagnação. Observou-se também o posicionamento dos contornos mais positivos a montante da região de abertura e dos sombreamentos, sendo maiores os seus valores de C_p s para quanto maior for a obstrução imposta ao escoamento incidente, tais como nas tipologias com elementos verticais em suas composições (G2B e G2C). Na tipologia G1B houve o aumento da área de estagnação, principalmente na região superior a jusante da abertura devido à repartição do escoamento que em parte migrou em direção às quinas e em parte foi direcionado para o interior da geometria. Em relação ao diferencial médio de pressão (ΔC_p médio), para os ângulos de 15° e 30°, a ordem de grandeza do impacto dos dispositivos, em relação às referências de análise, ainda ficou reduzida, variando entre 1% e -7% (Tabela 1).

Aos 45°, o posicionamento oblíquo da geometria em relação ao escoamento resultou em maior variação de pressão ao longo da largura da face barlavento (com C_p s variando no intervalo de 0,8 a -0,4) na tipologia selada (G1A). Nas tipologias G2B e G2C, além dos padrões de comportamento observados nas incidências anteriormente descritas (15° e 30°), somou-se a variação de pressão observada no entorno imediato à região da abertura e dos sombreamentos (região superior e inferior), decorrentes da atuação das zonas de separação originadas na interação das arestas dos dispositivos ao facearem o escoamento nessa incidência. Logo, os diferenciais de pressão, independentemente da referência observada (G1A ou G1B), reportaram maiores variações, computando decréscimos percentuais na faixa de -2% a -12% (Tabela 1).

Figura 7 - Gráficos de contorno das distribuições de pressão nas tipologias G1A, G1B, G2A, G2B e G2C expostas às incidências de vento de 0° a 90° e 180°



Fonte: Rossi (2021).

Tabela 1 - Coeficientes de pressão médios para as fachadas barlavento e sota-vento (C_{pm} barlavento e C_{pm} sota-vento) e diferenças de pressão médios (ΔC_{pm} médio) para as tipologias G1A, G1B, G2A, G2B e G2C nas diferentes incidências de vento (0° a 90° e 180°)

	Tipologia	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	180°
C_{pm} barlavento	G1A	0,56	0,54	0,44	0,27	-0,01	-0,41	-0,72	-0,32
	G1B	0,58	0,58	0,46	0,30	-0,01	-0,38	-0,68	-0,31
	G2A	0,58	0,58	0,49	0,33	0,07	-0,32	-0,63	-0,27
	G2B	0,58	0,54	0,47	0,27	0,03	-0,30	-0,60	-0,28
	G2C	0,61	0,58	0,48	0,29	0,03	-0,30	-0,59	-0,27
C_{pm} sota-vento	G1A	-0,31	-0,39	-0,47	-0,56	-0,68	-0,70	-0,72	0,58
	G1B	-0,29	-0,39	-0,46	-0,52	-0,59	-0,63	-0,69	0,58
	G2A	-0,27	-0,35	-0,42	-0,47	-0,57	-0,60	-0,64	0,60
	G2B	-0,29	-0,35	-0,45	-0,48	-0,56	-0,63	-0,67	0,59
	G2C	-0,25	-0,33	-0,42	-0,44	-0,52	-0,59	-0,64	0,63
ΔC_{pm} médio	G1A	0,86	0,93	0,91	0,83	0,67	0,29	-0,01	-0,90
	G1B	0,87	0,97	0,92	0,82	0,58	0,25	0,01	-0,89
	G2A	0,84	0,93	0,90	0,80	0,63	0,28	0,01	-0,88
	G2B	0,87	0,90	0,92	0,76	0,58	0,33	0,06	-0,88
	G2C	0,86	0,90	0,89	0,73	0,55	0,29	0,05	-0,90

Fonte: Rossi (2021).

Nos ângulos de incidência de 60° e 75° as faces já se encontravam sob maior influência das bolhas de separação ocasionadas pelo descolamento do escoamento na quina da geometria do modelo; desse modo, valores pouco positivos ou negativos de Cps caracterizaram as superfícies nessas orientações. A inclusão do dispositivo de sombreamento horizontal (G2A) pouco impactou na distribuição de pressão se comparada à referência G1B. Mais uma vez, maiores discrepâncias entre as tipologias com e sem sombreamentos foram observadas nos exemplares com elementos verticais (G2B e G2C).

Aos 90°, as faces com aberturas estavam tangentes ao escoamento; logo, nos modelos selado e com aberturas, notaram-se distribuições de pressão semelhantes nas faces opostas. A adição de elementos de sombreamento em uma das faces perturbou essa concordância, ao passo que, principalmente na região anterior à abertura e aos sombreamentos, reduziu a área de abrangência dos contornos destinados aos Cps mais negativos (intervalo de -0,8 a -1,2). Para o ângulo de incidência de 180°, o impacto no (ΔC_p médio), independentemente da referência de análise adotada, foi mínimo, variando de 1% a -3%, indicando a baixa influência dos dispositivos nessa orientação (Tabela 1).

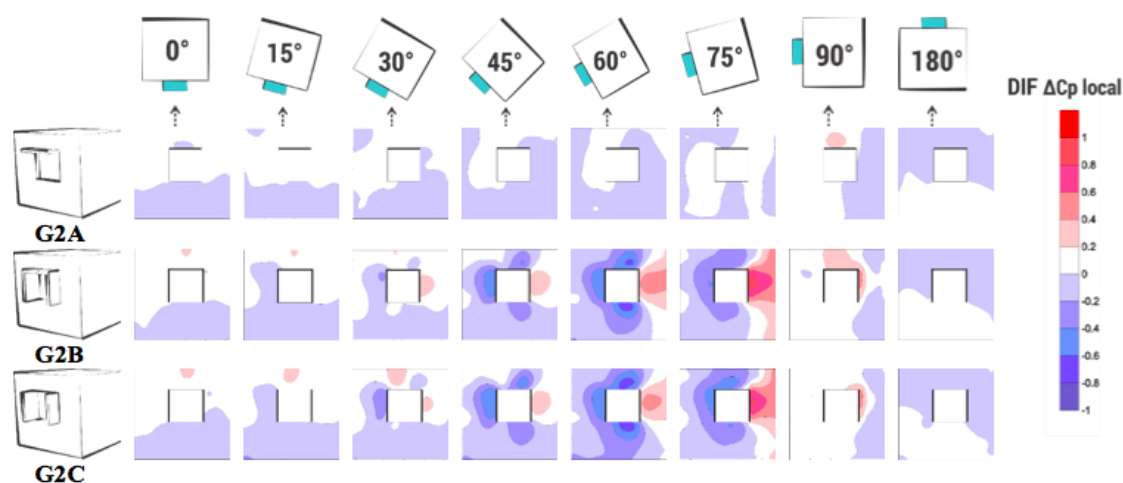
Nas faces sota-vento o impacto decorrente da adoção de dispositivos de sombreamento foi reduzido. O posicionamento dessas faces na esteira de vento, e assim com baixas variações de velocidades médias e pressões, resultou em distribuições de pressão (valores de Cps) mais constantes. Alterações, quando notadas, foram concentradas nas imediações da abertura, decorrentes da atuação do jato de saída (tipologias com aberturas) e de recirculações.

Variação entre os diferenciais de pressão locais (Dif = ΔC_p local com sombreamento - ΔC_p local referência)

Após a verificação da influência da adoção dos dispositivos de sombreamento no diferencial médio de pressão (ΔC_p médio) entre as faces destinadas às aberturas (barlavento e sota-vento), determinou-se o diferencial de pressão local para cada cenário, isto é, a diferença entre os valores de C_p capturados na tomada de pressão a barlavento deduzido do valor da sua correspondente a sota-vento. Com a obtenção desses dados, calculou-se para cada ponto na superfície do modelo a variação ($Dif = \Delta C_p$ local com sombreamento - ΔC_p local referência) entre os diferenciais de pressão das tipologias com sombreamento (ΔC_p local com sombreamento), ou seja, G2A, G2B e G2C e da tipologia de referência (ΔC_p local referência), sendo nesse caso o modelo selado (G1A), em que foram desconsideradas as tomadas de pressão situadas nas aberturas e conferindo, dessa forma, uma uniformidade de capturas entre os modelo.

As variações resultantes desse processo foram mapeadas a partir de gráficos de contorno (Figura 8), escalados entre 1,0 a -1,0, com intervalos de 0,2. Os tons avermelhados demarcam uma variação positiva entre a tipologia com sombreamento e a referência. Já para os tons azulados as variações são negativas.

Figura 8 - Gráficos de contorno da variação entre o diferencial de pressão local da tipologia com sombreamento em relação ao modelo genérico selado ($Dif = \Delta C_p$ local com sombreamento - ΔC_p local referência)



Fonte: Rossi (2021).

Em concordância com as análises anteriores (C_p s e ΔC_p médio) a magnitude das diferenças observadas nas incidências de vento de 0° a 30° e 180° , independentemente da tipologia de sombreamento adotada, foi reduzida. Nessas situações o intervalo da diferença se manteve entre 0,2 a -0,2, sendo, majoritariamente, classificado entre 0 e -0,2. Esse padrão foi decorrente dos valores superiores de C_p encontrados na tipologia selada para as mesmas situações. A G1A, por não apresentar aberturas, não teve a sua distribuição de pressão influenciada pela ação do escoamento na abertura de entrada ou de saída, como observado nas demais. Algumas regiões pontuais, caracterizadas por diferenças mais positivas ou negativas, foram notadas nas tipologias com elementos verticais devido à inclinação do escoamento em relação ao modelo nas rotações de 15° e 30° .

Esse padrão se intensificou nas incidências de 45° a 75° para as tipologias G2B e G2C, pelo mesmo motivo, indicando a concentração do escoamento a montante do primeiro elemento vertical (diferenças variando de 0,2 a 1,0) e o seu descolamento a jusante do segundo elemento (valores entre -0,2 a -0,8). A 90° , todas as tipologias apresentaram em maior ou menor grau diferenças positivas no entorno imediato da abertura, que justificam os incrementos dos ΔC_p m em relação aos modelos de referência, conforme já discutidos anteriormente.

Conclusões

O uso conjugado das estratégias de ventilação natural e sombreamento das aberturas deve ser considerado desde as etapas iniciais do processo de projeto, nas quais se determina a forma dos sombreamentos a partir da definição de máscaras de sombra para reduzir a radiação solar direta indesejada.

O Brasil, em razão da sua posição geográfica e extensão, apresenta altos índices de radiação solar variando ao longo do território. Ademais, a maioria das edificações dependem majoritariamente da ventilação natural como forma de condicionamento térmico dos ambientes. Dessa forma, é válida a verificação da influência dos dispositivos de sombreamento nas condições de ventilação natural no ambiente, tanto do ponto de vista quantitativo, quanto qualitativo.

A complexidade atrelada à ventilação natural é justificada pela sensibilidade desse fenômeno físico às condicionantes externas e internas às edificações, ou seja, a configuração estudada.

Na fase de concepção (fase de análise) é importante que ferramentas simplificadas (de visualizações, *softwares* ou aplicativos baseados em fluidodinâmica e ensaios em mesa d'água; ou de estimativa, métodos analíticos ou empíricos) subsidiem as tomadas de decisões.

Já nas fases de síntese e avaliação, as ferramentas de simulação computacional podem ser aplicadas para refinar ou avaliar determinada estratégia ou desempenho da edificação.

Nesse contexto, situa-se a importância de estudos genéricos na tentativa de mapear regras gerais ou de delinear diretrizes projetuais. No caso específico da ventilação natural, o coeficiente de pressão (C_p) é o dado usualmente requerido ou determinado por programas de simulação computacional. Dessa forma, entender o impacto quantitativo da adoção de dispositivos de sombreamento, ainda que em modelo genérico, pode fornecer aos projetistas ou pesquisadores da área uma sensibilidade acerca da ordem de grandeza dessa influência ou da divergência na estimativa da ventilação natural por meio de valores padrões disponibilizados nos bancos de dados internos de algumas ferramentas.

Para os dispositivos de sombreamento estudados neste trabalho, para a configuração G1A (modelo selado sem aberturas), a presença dos dispositivos de sombreamento reduziu os diferenciais de pressão em quase todos os cenários analisados, com exceção da situação a 90° (para todas as tipologias), da situação com dispositivos de sombreamento combinados, G2B (nas incidências de vento de 0° , 30° e 75°) e da tipologia com protetores verticais, G2C (nas rotações de 75° e 180°). Já, quando a referência foi a G1B (modelo aberto), um impacto positivo foi observado, além das situações anteriormente citadas, na tipologia com dispositivo horizontal, G2A (60° e 75°) e com dispositivos mistos, G2B (60°). Aos 75° , maior discrepância entre os ΔC_p médios calculados para os modelos selado e com aberturas foi notada (0,29 e 0,25, respectivamente). Essa diferença repercute nos percentuais e indica, em algumas situações, impacto positivo (incremento do ΔC_p m) em relação à G1B, e negativo (redução do ΔC_p m) para a G1A.

Nos resultados apresentados, notou-se que a adoção de um coeficiente médio por fachada de modelos selados e lisos para estimar taxas de ventilação de edificações, que façam uso concomitante de sombreamento em suas aberturas, pode incrementar erros e com impacto de ordem de grandeza relativa à geometria do dispositivo de sombreamento e ao ângulo de incidência dos ventos predominantes.

Em síntese, conclui-se que:

- (a) menores influências dos dispositivos foram verificadas no intervalo de incidência de vento de 0° a 30° e a 180°, independentemente da tipologia e da referência de análise observada (G1A ou G1B);
- (b) a G2A (dispositivo de sombreamento horizontal) apresentou menor impacto quando comparada às tipologias G2B e G2C;
- (c) maiores influências ocorreram a partir dos 45°, principalmente nas tipologias com elementos verticais (G2B e G2C);
- (d) a 90°, a inclusão dos dispositivos incrementou o diferencial entre as faces opostas; e
- (e) maiores discrepâncias na distribuição de pressão dos modelos com e sem sombreamentos foram observadas no entorno imediato das aberturas, para os diferentes ângulos de incidência, seja na face a barlavento, pela atuação das zonas de separação e de concentração do escoamento ao interceptar os dispositivos, seja na face a sota-vento, devido à influência do fluxo de saída ou das recirculações.

Essa constatação pode indicar que o diferencial de pressão médio (ΔC_p médio), originado a partir das médias das faces barlavento e sota-vento, possa não ser a melhor alternativa para a tradução ou captura do impacto dos dispositivos de sombreamento nas suas distribuições de pressão e que outras áreas para a determinação desse parâmetro possam ser estudadas.

Quanto às limitações do estudo, destaca-se a não variação das dimensões dos elementos de sombreamento (profundidades ou comprimentos) ou do posicionamento deles em relação aos limites do vão, já que em todas as tipologias eles apresentaram profundidades idênticas e foram dispostos rentes à abertura.

Por fim, reforça a importância de decisões arquitetônicas alicerçadas em dados científicos (qualitativos e quantitativos) que por vezes são desconhecidos ou evitados pelos projetistas. Contudo, o aporte do dado científico pode resultar em maior autonomia ao projetista e coerência na proposição projetual, sendo o usuário possivelmente beneficiado ao fim desse processo.

Referências

- Al, Z. T. *et al.* The effect of balconies on ventilation performance of low-rise buildings. **Indoor Built Environment**, v. 20, n. 6, p. 649–660, 2011.
- ALLARD, F. **Natural ventilation in buildings: a design handbook**. London: James & James, 2002.
- ANCHIETA, C. **Regression models to assess the thermal performance of Brazilian low-cost houses: consideration of solar incidence and shading devices**. São Carlos, 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220: desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro, 2005.
- ATKINS, R. E.; PETERKA, J. A.; CERMAK J. E. Averaged pressure coefficients for rectangular buildings. In: WIND ENGINEERING, PROCEEDINGS OF THE FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE, Fort Collins, 1979. **Proceedings [...]** Fort Collins: Pergamon Press, 1979.
- AYNSLEY, R. M.; MELBOURNE, W.; VICKERY, B. J. **Architectural aerodynamics**. London: Applied Science Publishers, 1977.
- BITTENCOURT, L.; BIANA, G.; CRUZ, J. M. Efeito dos protetores solares verticais e horizontais na ventilação natural de salas de aula do 2º grau. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 3.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1., Gramado, 1995. **Anais [...]** Gramado: ANTAC, 1995.
- BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural**. Maceió: EDUFAL, 2008.
- BRE, F.; GIMENEZ, J. M. A cloud-based platform to predict wind pressure coefficients on buildings. **Building Simulation**, v. 15, p. 1507–1525, 2022.
- 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.
- CASTAÑO, H. F. M. **Impacto de dispositivos de sombreamento externos e muro na ventilação natural e no desempenho térmico de uma habitação de interesse social térrea**. São Carlos, 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

- CHAND, I.; BHARGAVA, P. K.; KRISHAK, N. L. V. Effect of balconies on ventilation inducing aeromotive force on low-rise buildings. **Building and Environment**, v. 33, n. 6, p. 385–396, 1998.
- CHAND, I.; KRISHAK, N. L. V. Laboratory studies of the effect of louvers on room air motion. **Building Science**, v. 6, n. 4, p. 247–252, 1971.
- CÓSTOLA, D. *et al.* Uncertainty in airflow rate calculations due to the use of surface-averaged pressure coefficients. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 6, p. 881–888, 2010.
- CÓSTOLA, D.; BLOCKEN, B.; HENSEN, J. L. M. Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs. **Building and Environment**, v. 44, n. 10, p. 2027–2036, 2009.
- CP SIMULATOR. **Cp simulator**: prediction of wind pressure coefficients on buildings. 2019. Disponível em: <https://cpsimulator.cimec.org.ar/#>. Acesso em: 1 abr. 2021.
- DEPARTMENT OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY. **Input-Output Reference**. Version 9.5.0. US: Department of Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Building Technologies, 2021. Disponível em: https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel_custom/pdfs/pdfs_v9.5.0/InputOutputReference.pdf. Acesso em: 09 abr. 2021.
- EVOLA, G.; POPOV, V. Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 5, p. 491–501, 2006.
- FAVRETTO, A. P. O. **Regression models to assess the thermal performance of Brazilian low-cost houses**: consideration of opaque envelope. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.
- GIVONI, B. **Man, climate and architecture**. 2nd ed. London: Applied Science Publishers, 1976.
- HIEN, W. N.; ISTIADJI, A. D. Effects of external shading devices on daylighting and natural ventilation. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE EINDHOVEN, 8., Eindhoven, 2003. **Proceedings [...]** Eindhoven, 2003.
- HILDEBRAND, P. W. **Shading and Cooling**: impacts of solar control and windows on indoor airflow. Berkeley, 2011. Master thesis – University of California, Berkeley, 2011.
- HOLMES, J. D. **Wind Loads on low-rise buildings**: the structural and environmental effects of wind on buildings and structures. Melbourne: Monash University, 1986.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Processamento dos dados do túnel de vento**. São Paulo: IPT, 2018.
- 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.
- KIRIMTAT, A. *et al.* Review of simulation modeling for shading devices in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 23–49, 2016.
- KOTANI, H.; YAMANAKA, T. Wind pressure coefficient and wind velocity along building wall of apartment building with balcony. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDOOR AIR QUALITY, VENTILATION & ENERGY CONSERVATION IN BUILDINGS, 6., Sendai, 2007. **Proceedings [...]** Sendai: IAQVEC, 2007.
- KOWALTOWSKI, D. C. C. K. *et al.* A visualização do conforto ambiental no projeto arquitetônico. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7., Florianópolis, 1998. **Anais [...]** Florianópolis: ANTAC, 1998.
- KOWALTOWSKI, D. C. C. K. *et al.* The challenges of teaching bioclimatic architectural design. In: INTERNATIONAL CONFERENCE: PASSIVE AND LOW ENERGY COOLING FOR THE BUILT ENVIRONMENT, Santorini, 2005. **Proceedings [...]** Santorini, 2005.
- LECHNER, N. **Heating, cooling, lighting**: sustainable design methods for architects. Wiley: New York, 2009.
- LIDDAMENT, M. W. **A guide to energy efficient ventilation**. Coventry: Oscar Faber, 1996.

- LOCHE, Í. M. C. F. W. *et al.* Effects of balconies on the wind pressure coefficients of naturally ventilated high-rise office buildings. In: ANNUAL SYMPOSIUM ON SIMULATION IN ARCHITECTURE +URBAN DESIGN, 11., San Diego, 2020. **Proceedings [...]** San Diego, 2020. Evento virtual na Austria.
- MACIEL, L. *et al.* Influence of application of accurate airflow resistance on openings with different configurations of shading devices on the building thermal performance. In: PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, Edinburgh, 2017. **Proceedings [...]** Edinburgh, 2017.
- MARQUES DA SILVA, F. Acções que promovem a ventilação natural. In: SANTOS, J. P. (org.). **Seminário Ambiente em Edifícios Urbanos**. 2. ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2004.
- MARQUES DA SILVA, F. Aplicação da ventilação natural e mista em edifícios: as acções introdutoras da ventilação natural. **Cadernos Edifícios**, n. 6, p. 7-26, 2010.
- MATHAN KANNAN, K.; NAGARAJAN, R. V; DHANALAKSHMI, M. Influence of external concrete shading devices on internal airflow pattern through windows. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, v. 9, n. 8, p. 1555–1563, 2018.
- MELIKOV, A. K. COVID-19: reduction of airborne transmission needs paradigm shift in ventilation. **Building and Environment**, v. 186, p. 19–21, 2020.
- MERONEY, R. N. CFD Prediction of airflow in buildings for natural ventilation. In: AMERICAS CONFERENCE ON WIND ENGINEERING, 11., San Juan, 2009. **Proceedings [...]** San Juan, 2009.
- MONTAZERI, H.; BLOCKEN, B. CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: Validation and sensitivity analysis. **Building and Environment**, v. 60, p. 137–149, 2013.
- NEVES, L. O. *et al.* Envelope design of mixed-mode office buildings: theory versus practice. In: PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, Edinburgh, 2017. **Proceedings [...]** Edinburgh, 2017.
- PRIANTO, E.; DEPECKER, P. Characteristics of airflow as the effect of balcony, opening design and internal division on indoor velocity: a case study of traditional dwelling in urban living quarter in tropical humid region. **Energy and Buildings**, v. 34, n.4, p 401-409, 2002.
- QUADROS, B. M. de; ORDENES, M. O Impacto de brises na ventilação natural: avaliação integrada em uma enfermaria em Florianópolis (SC). **Paranoá: Cadernos de Arquitetura e Urbanismo**, n. 19, 2017.
- RIVERO, R. **Arquitetura e clima: condicionamento térmico natural**. Porto Alegre: Luzzato, 1985.
- ROFAIL, A. W.; KWOK, K. C. S. The effect of sunshading elements on cladding pressures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WING ENGINEERING, 10., Copenhagen, 1999. **Proceedings [...]** Copenhagen: ICWE, 1999.
- ROSSI, M. M. **Dispositivos de sombreamento: avaliação do impacto no desempenho da ventilação natural**. São Carlos, 2021. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.
- ROSSI, M. M. **Regression models to assess the thermal performance of Brazilian low-cost houses: consideration of natural ventilation**. São Carlos, 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.
- ROSSI, M. M. *et al.* Desenvolvimento de modelo genérico para avaliação do impacto de dispositivos de sombreamento na ventilação natural. In: PALME, M.; LOBOS, D.; ROBLES, C. (ed.) CONGRESO SUDAMERICANO DE SIMULACIÓN DE EDIFICIOS, 5., Valparaíso, 2018. **Anais [...]** IBPSA Latam: Valparaíso, 2018.
- SANTAMOURIS, M.; WOUTERS, P. **Building ventilation: the state of the art**. London: Earthscan, 2006.
- SANTESSO, C. A. **Integração da ventilação híbrida e da iluminação natural em saletas comerciais na cidade de São Paulo: influência de parâmetros de projeto**. São Carlos, 2017. Dissertação (Mestrado Ciências) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.
- STATHOPOULOS, T.; ZHU, X. Wind pressure on buildings with appurtenances. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 31, p. 265-281, 1988.
- SWAMI, M. V.; CHANDRA, S. Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural-ventilation airflow. **ASHRAE Transactions**, v. 94, p. 243-266, 1988.

TOKYO POLYTECHNIC UNIVERSITY. **Aerodynamic database for low-rise buildings**. 2021. Disponível em: http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/windpressure/lowrise. Acesso em: 1 abr. 2021.

TOLEDO, E. **Ventilação Natural das habitações**. Coordenação da versão Brasileira: Alexandre Toledo. Maceió: EDUFAL, 1999.

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**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 37–58, 2010.

VETTORAZZI, E. *et al.* Proposta de dispositivo para aumentar o desempenho de janelas e fachadas em termos de ventilação natural e auxiliar no controle da radiação solar direta. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., São Paulo, 2016. **Anais [...]** São Paulo: ENTAC, 2016.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes) – Código de Financiamento 001. Os autores agradecem à Capes pelo apoio financeiro e ao Instituto de Pesquisas do Estado de São Paulo (IPT) por viabilizar os ensaios no túnel de vento.

Michele Marta Rossi

Centro de Tecnologia, Departamento de Construção Civil e Arquitetura | Universidade Federal do Piauí | Campus Universitário Ministro Petrônio Portela, Bairro Ininga | Teresina - PI - Brasil | CEP 64049-550 | Tel.: (86) 3215-5725 | E-mail: michele.marta.rossi@gmail.com

Karin Maria Soares Chvatal

Instituto de Arquitetura e Urbanismo | Universidade de São Paulo | Av. Trabalhador São-Carlense, 400, Centro | São Carlos - SP - Brasil | CEP 13566-590 | Tel.: (16) 3373-8600 | E-mail: karin@sc.usp.br

Alessandra Rodrigues Prata-Shimomura

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo | Universidade de São Paulo | Rua do Lago, 876, Butantã | São Paulo - SP - Brasil | CEP 05508-080 | Tel.: (11) 3091-4681 | E-mail: arprata@usp.br

Fernando Vitor Marques da Silva

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas | Av. do Brasil, 101 | Lisboa - Portugal | 1700-066 | Tel.: +(351) 218 443-862 | E-mail: fms@lnec.pt

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.