



# Análise da influência da geometria do edifício na distribuição de coeficientes de pressão em um edifício isolado: simulação CFD

## Analysis of the influence of geometry building on pressure coefficient distribution on an isolated building: CFD simulation

### Marieli Azoia Lukiantchuki

Universidade Estadual de Maringá  
Avenida Colombo, n.5790 – Jardim Universitário. CEP: 87020-900, Maringá - PR  
malukiantchuki2@uem.br

### Alessandra R. Prata Shimomura

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo  
Rua do Lago, 876 – Butantã. CEP 05508-080, São Paulo, SP  
arprata@usp.br

### Fernando Marques da Silva

Laboratório Nacional de Engenharia Civil - Lnec  
Avenida do Brasil, 101. CEP: 1700-066. Lisboa, Portugal  
fms@lnec.pt

### Rosana Maria Caram

Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, Universidade de São Paulo  
Avenida Trabalhador São-Carlense, 400 – Centro. CEP: 13566-590. São Carlos - SP  
rcaram@sc.usp.br

**Manuscript Code:** XXX (esto no debe llenarse)

**Date of Acceptance/Reception:** XX.XX.2018/XX.XX.2018 (esto no debe llenarse)

### Resumo

O conhecimento da distribuição de pressão nas paredes do edifício é importante para a avaliação de cargas de vento e ventilação natural. As distribuições de pressão induzidas pelo vento são influenciadas por uma ampla gama de fatores, incluindo condições de fluxo de aproximação, ambiente urbano e geometria do edifício. A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) pode ser uma ferramenta valiosa para determinar os coeficientes médios da pressão do vento nas fachadas dos edifícios. No entanto, embora muitos estudos de CFD sobre a pressão média do vento em edifícios tenham sido realizados no passado, a grande maioria desses estudos concentrou-se em geometrias simples de edifícios, sem detalhes de volume, como *sheds* na cobertura. A falta de dados para geometrias complexas leva os projetistas a usar bancos de dados existentes para geometrias simples, o que não é compatível com a distribuição de pressão na superfície de edifícios com geometrias complexas. Além disso, muitas vezes dados de  $C_p$  (coeficiente de pressão) no ponto médio da fachada são adotados como dados de entrada do *software* de desempenho térmico. No entanto, os detalhes das geometrias podem influenciar drasticamente o padrão de fluxo e a distribuição geral de pressão na fachada. Neste estudo, investigou-se a influência da geometria e da direção do vento na distribuição do  $C_p$  em torno de edifícios isolados. Dois modelos são analisados: o modelo um possui geometria simples (paralelepípedo) e no modelo dois foram incluídos *sheds* na cobertura (geometria complexa). Os *sheds* são aberturas no telhado que funcionam como captadores e extratores de ar. Nota-se que os *sheds* ocasionam mudanças muito significativas na distribuição da pressão do vento, porque eles introduzem múltiplas áreas de separação de fluxo e recirculação através da fachada.

**Palavras chaves:** Simulação CFD; Ventilação natural; Coeficientes de pressão; Edifício paralelepípedo; Edifícios com coberturas em *sheds*

### Abstract in English

Knowledge of the pressure distribution on building walls is important for the evaluation of wind loads and natural ventilation. Wind-induced pressure distributions are influenced by a wide range of factors including approach-flow conditions, urban surroundings and building geometry. Computational Fluid Dynamics (CFD) can be a valuable tool for determining mean wind pressure coefficients on building facades. However, while many CFD studies of mean wind pressure on buildings have been performed in the past, the vast majority of these studies focused on simple building geometries without volume details such as shed roof. The lack of data for complex geometries leads designers to use existing databases for simple geometries, which is not compatible with the pressure distribution on the surface of buildings with complex geometries. In addition, often pressure coefficient data at the midpoint of the facade is adopted as input data of thermal performance software. Geometries details however can drastically influence the flow pattern and the overall pressure distribution on the facade. In this study, the influence of geometry building and wind direction on pressure coefficient distribution around isolated building were investigated. The aim of this study is to analyze the difference of the  $C_p$ s distribution on surfaces of a isolated building. Two models are analyzed: the model one is simple geometry (parallelepiped) and in model two were included sheds on the roof (complex geometry). The sheds are openings on the roof which functions as air collectors and extractors. All analyzed models have the same dimensions. It is shown that shed roof building can lead to very strong changes in wind pressure distribution, because they introduce multiple areas of flow separation and recirculation across the facade.

**Keywords:** CFD simulation; natural ventilation; pressure coefficients; parallelepiped building; sheds roof building

O conhecimento da distribuição de pressão nas paredes do edifício é essencial para avaliar a ventilação natural induzida pelo vento e para avaliar as cargas de vento nas paredes e componentes dos edifícios (Cóstola, Blocken & Hensen, 2009; Montazeri e Azizian, 2008;; Karava, Stathopoulos e Athientis, 2004). Os coeficientes de pressão ( $C_p$ ) são um dos principais parâmetros no estudo da ventilação natural pela ação dos ventos, sendo considerado um dos parâmetros com maior influência no desempenho térmico do edifício. É um importante dado de entrada para vários programas de simulação de desempenho térmico do edifício e de cálculos de fluxo de ar, como Energyplus, Aiolos, Contam e EDSL-TAS (Wit, 2001; Orme, 1999; Crawley et al., 2008). O coeficiente de pressão ( $C_p$ ) é definido como o quociente adimensional entre a pressão dinâmica medida em um ponto  $x$  na fachada do prédio ( $P_x$ ) e a pressão dinâmica do fluxo de ar não perturbado ( $P_d$ ), representado pela equação 1 (Awbi 1998, Etheridge e Sandberg, 1996). A pressão dinâmica de fluxo não perturbada ( $P_d$ ) é a força por unidade de área exercida pelo vento em um plano ortogonal à direção do fluxo (equação 2).

$$C_p = \frac{P_x}{P_d} \quad (\text{Equação 1})$$

$$P_d = \frac{\rho V_{ref}^2}{2} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$P_d$ : Pressão dinâmica do fluido (Pa)

$V_{ref}$ : velocidade de referência medida na mesma altura da cobertura do edifício (m/s)

$\rho$ : massa específica do ar ( $\text{Kg/m}^3$ )

A distribuição de pressão nas paredes do edifício é influenciada por uma ampla gama de fatores, incluindo condições de fluxo de aproximação (Stathopoulos, 1997), ambiente urbano (Kim, Yoshida & Tamura, 2012), geometria da edificação (Uematsu & Isyumov, 1999) e direção do vento (Levitan, Mehta, Vann & Holmes, 1991). Em particular, a construção com geometria complexa pode afetar as distribuições de pressão de superfície média e máxima nas paredes e telhados dos edifícios (Stathopoulos & Zhu, 1988).

Não há muitos dados de  $C_p$ s disponíveis para *designers*, especialmente de geometrias complexas. Os bancos de dados existentes fornecem um número limitado de dados de  $C_p$ , e estes são para edifícios com geometrias simplificadas, como cubos, cilindros e paralelepípedos de diferentes proporções (Cóstola et al., 2009; Allard, 1998; Santamouris & Wouters, 2006; Bittencourt & Cândido, 2008). Uma prática comum na ausência desses dados é o uso de valores de  $C_p$  obtidos para outros edifícios de formatos semelhantes, o que ocasiona erros na análise do fluxo de ar. Além disso, o uso do  $C_p$  médio da fachada aumenta a probabilidade de erros no cálculo do fluxo de ar, apresentando diferenças de até 40% (Cóstola et al., 2010).

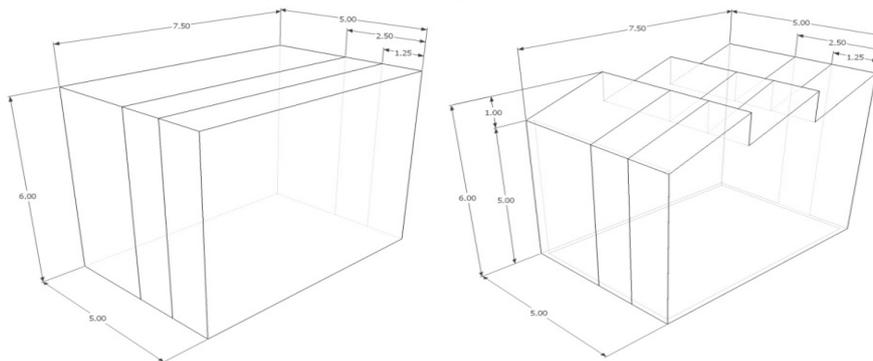
O CFD foi usado em muitas ocasiões no passado para determinar as distribuições de pressão induzidas pelo vento nas fachadas dos edifícios. Cóstola e Alucci (2011) afirmam que o uso de CFD para definir  $C_p$  é viável e constitui uma importante alternativa aos túneis de vento. No entanto, diferentes configurações de simulação levam a desvios consideráveis, tanto em termos absolutos (até  $\pm 0,5\%$ ) quanto em termos relativos (até 50%). Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da geometria e da direção do vento na distribuição do  $C_p$  em torno de edifícios isolados através de simulações CFD para obter  $C_p$ s. É importante enfatizar que o presente artigo não propõe fornecer resultados realistas de  $C_p$ , que dependem da validação das simulações através da comparação com experimentos de pequena escala e edifícios reais.

## Metodología

### Descrição dos modelos avaliados

Dois modelos foram avaliados: o modelo um apresenta uma geometria simples (paralelepípedo) com dimensões de 5m x 7,5m x 6m ( $L \times C \times H$ ). O modelo dois possui as mesmas dimensões que o modelo um. No entanto, apresenta a cobertura composta de três *sheds* de geometria ortogonal (dente-de-serra), com inclinação de 22° e distanciados um do outro em 2,50m (geometria complexa). Os modelos avaliados são totalmente vedados, ou seja, não apresentam aberturas. Coeficientes de pressão ( $C_p$ ) foram medidos na superfície do edifício ao longo de três linhas verticais: a linha central foi localizada no eixo central, a uma distância de 2,50m da lateral do edifício. As linhas de borda foram localizadas a 1,25m da lateral do edifício (Figura 1). Neste artigo, vamos nos referir a essas linhas verticais como “linha central” e “linhas de borda”, respectivamente. Com relação aos ângulos de incidência dos ventos externos, os modelos foram avaliados para os ângulos de incidência de 0° e 180°, representando, respectivamente, os *sheds* como uma situação de extratores e captadores de ar.

Figura 1. Modelos avaliados com indicação dos eixos de medição dos coeficientes de pressão na superfície dos edifícios

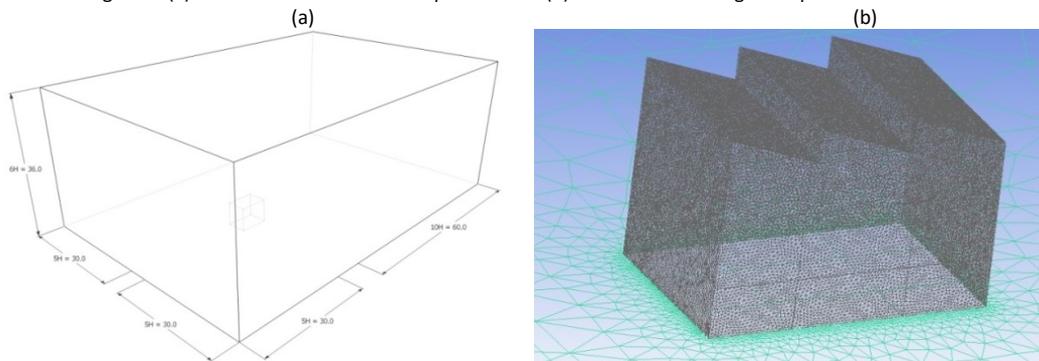


### Simulação por Dinâmica dos Fluidos Computacional

Para as simulações, utilizou-se o *software* CFX 12.0, baseado na Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), sendo adequado ao estudo da ventilação natural nos edifícios e amplamente utilizado nas pesquisas de análise de fluidos nas áreas de engenharia e arquitetura, apresentando coerência dos resultados com os fenômenos físicos.

O modelo tridimensional do edifício e do domínio foi realizado com o *software* AutoCAD. Optou-se pelo domínio retangular por possibilitar um número menor de elementos na malha e, conseqüentemente, a redução do tempo de processamento das simulações. As dimensões seguiram as recomendações de Harries (2005), Franke et al. (2007) e Tominaga et al. (2008): distâncias a barlavento e nas laterais = 5H (25 m); altura = 6H (30 m); e, distância a sotavento = 15H (75 m); sendo H = 5 m, que corresponde à altura do modelo simulado (Figura 2.a). A área de obstrução do edifício no domínio atendeu à sugestão de Cost (2004), que recomenda um valor abaixo de 3%. Assim, evita-se o efeito de blocagem, impedindo que as fronteiras do domínio influenciem no escoamento. Utilizou-se uma malha estruturada tetraédrica, cujos parâmetros globais foram: (a) *maximum element size* 16; (b) *natural size* 4; e (c) *cells in gap* 8. A malha foi refinada nas superfícies do edifício em um valor de 0,10m, a fim de melhorar a visualização do fluxo de ar no espaço interno e no entorno imediato ao edifício (Figura 2.b). A combinação desses parâmetros determina a quantidade de elementos da malha e, assim, o tempo de processamento das simulações.

Figura 2. (a) Dimensões do domínio computacional e (b) malha tetraédrica gerada para todos os casos



As condições do domínio foram: (a) entrada como *Inlet* e a saída como *Outlet*; (b) as laterais e o teto como *Wall free slip* (sem atrito), pois não impõe resistência às partes do domínio onde não são realizadas análises importantes; e (c) o piso e as superfícies do edifício como *Wall no slip* (com atrito). A velocidade da entrada foi de ( $U = 2,5$  m/s), e como entorno um ambiente suburbano com valor de  $\alpha = 0,25$ , adotado através de BRE (1987), usando a equação 3 a seguir.

$$\frac{U}{U_{ref}} = \left( \frac{h}{h_{ref}} \right)^\alpha \quad \text{(Equação 3)}$$

Onde:

U: velocidade média do vento em certa altura h (m/s);

Uref: velocidade do vento medida na altura de referência (m/s);

h: altura da edificação que se deseja avaliar a velocidade do vento (m);

href: altura de referência da velocidade do vento (10 m);

$\alpha$ : expoente de lei de potência da camada limite atmosférica (entorno).

A simulação decorreu em regime permanente, na condição isotérmica a 25 °C (ação dos ventos). Segundo Brandão (2009), simulações apenas do campo de ventos, normalmente, são realizadas em regime permanente. Isso ocorre porque as condições de contorno são constantes e a relação entre o campo de velocidade e a velocidade de entrada do ar no modelo se mantém constante para velocidades médias ou altas. De acordo com Cóstola (2006), a simulação

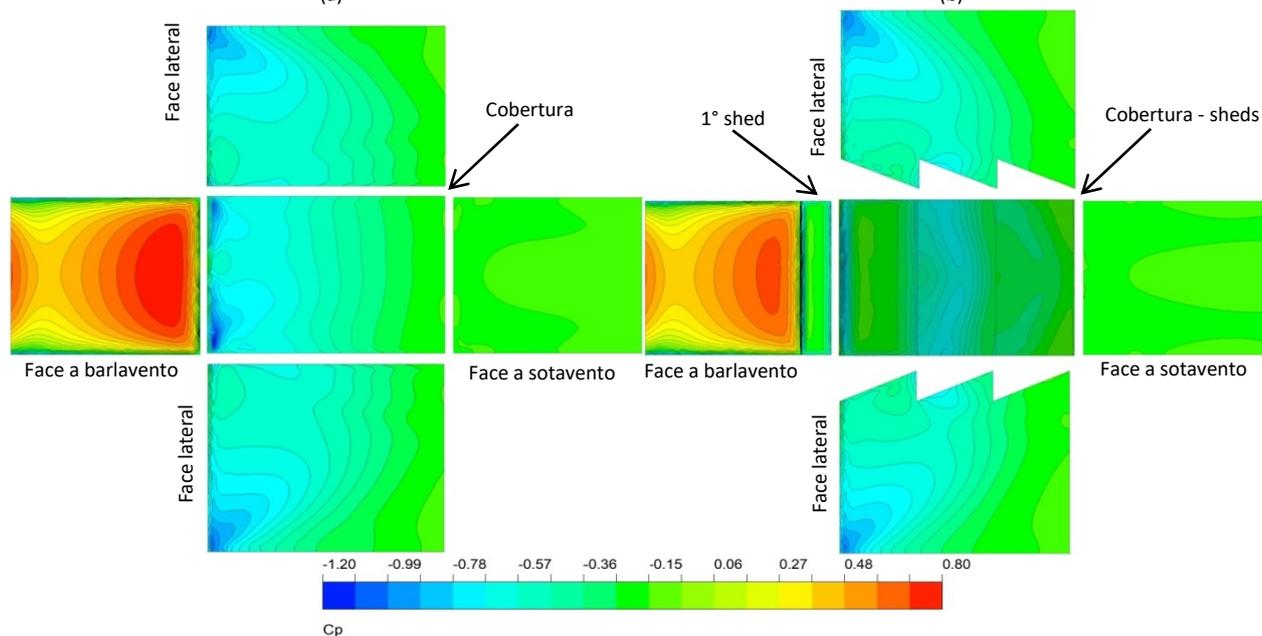
em regime transiente só se justifica para o uso do modelo LES, o que não é o caso do presente artigo. O modelo de turbulência utilizado foi o K-Epsilon, que é comum e bem estabelecido em diversas pesquisas de dinâmica dos fluidos e ventilação natural (Calautit; Hughes, 2014). Além disso, usa-se esse modelo por oferecer a melhor relação entre custo (tempo de processamento) e benefício (precisão). Neste modelo os efeitos da turbulência no escoamento médio são descritos por meio de duas equações: uma para a energia cinética turbulenta ( $k$ ) e outra para a taxa de dissipação da turbulência ( $\epsilon$ ). A modelagem da turbulência, ainda, é um tema controverso e o presente artigo não tem por objetivo abordá-lo. É altamente recomendável que os futuros trabalhos abordem esse tema de maneira detalhada, buscando a melhor relação entre qualidade dos resultados obtidos e capacidade computacional necessária. O nível de convergência foi estabelecido quando todos os níveis residuais alcançaram um valor máximo de  $10^{-4}$ . Os números de iterações mínimos e máximos adotados foram de 600 e 6.000, respectivamente. Esses parâmetros foram baseados em pesquisas sobre ventilação natural, utilizando o CFX (Brandão, 2009; Cóstola, 2006; Leite, 2008; Prata, 2005).

## Resultados e Discussão

### Impacto da geometria nos valores de Cps na superfície de edifícios vedados

O impacto da geometria dos edifícios nos valores de  $C_p$  é investigado através da comparação de um edifício de geometria simples com um edifício de geometria complexa, com *sheds* na cobertura. Esta seção apresenta os resultados para a incidência do vento perpendicular a fachada ( $0^\circ$ ). A Figura 3 apresenta a distribuição dos  $C_p$ s na superfície dos dois modelos avaliados. Nota-se claramente uma diferença na distribuição dos  $C_p$ s em função do acréscimo de *sheds* na cobertura do modelo. Na face a barlavento, embora o padrão de distribuição seja similar, os valores são diferentes, principalmente no ponto médio da fachada. A divergência entre os modelos é maior na superfície da cobertura, tanto em valores de  $C_p$ s como no padrão da distribuição das pressões ao longo da superfície.

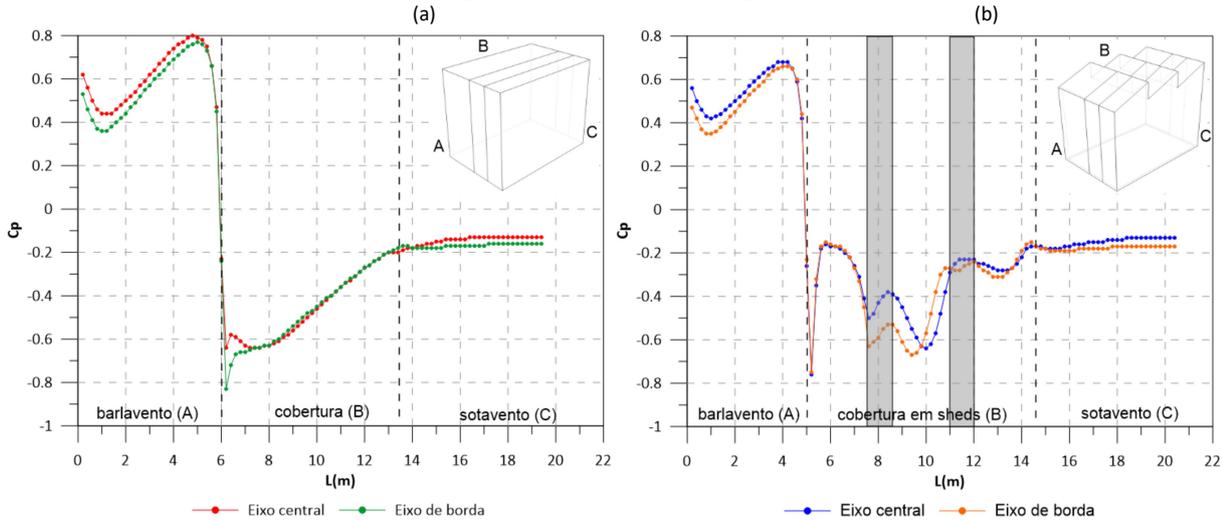
Figura 3. Distribuição dos  $C_p$ s nas superfícies do (a) modelo 1- paralelepípedo e (b) modelo 2 – edifício com *sheds* na cobertura



Essa análise fica mais clara com o gráfico da Figura 4, que compara os resultados da simulação CFD dos valores de  $C_p$  ao longo dos eixos de medição verticais (eixos central e de borda) para o edifício paralelepípedo e o edifício com *sheds* na cobertura. O gráfico confirma a complexidade da distribuição dos  $C_p$ s ao longo da cobertura do edifício com *sheds* e o impacto da geometria dos modelos na distribuição de pressão na superfície dos edifícios.

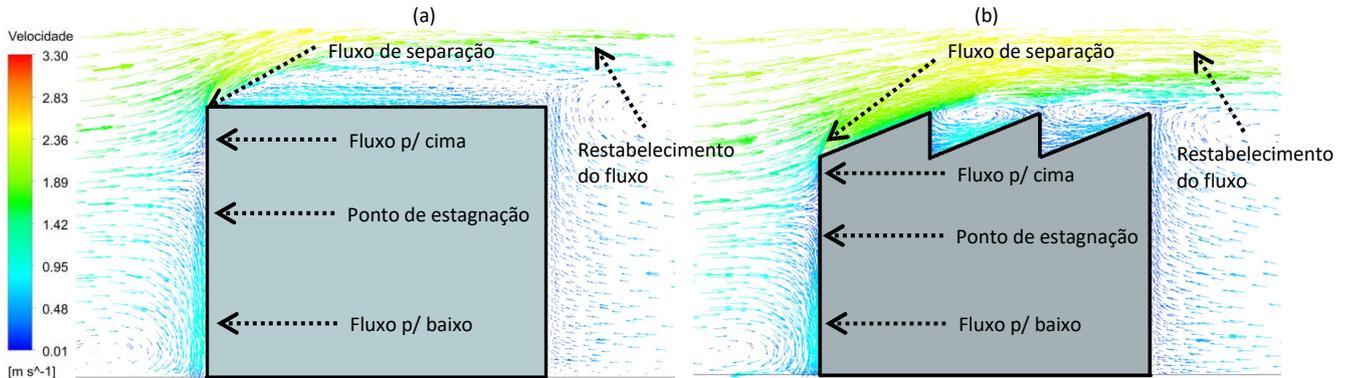
Na face a barlavento, a meia altura da fachada, tanto para o eixo central como para os eixos laterais, os valores de  $C_p$  se convergem, apresentando dados similares para os dois modelos analisados. No eixo central, os valores no meio da fachada são idênticos e para os eixos laterais, notam-se pequenas diferenças. Nesse caso, em simulações de desempenho térmico que é comum o uso dos valores de  $C_p$  pelo ponto médio na fachada, essa mudança na geometria não acarretaria diferenças significativas. No entanto, ao longo do eixo da fachada, nota-se uma divergência, em função das diferentes geometrias. A presença dos *sheds* na cobertura produz um perfil de  $C_p$  diferente ao longo da fachada, principalmente na região inferior e superior (próximo ao *sheds*), registrando zonas de pressão mais baixas, causadas pela multiplicidade de áreas de separação de fluxo e recirculações induzidas por esses elementos na cobertura. Essa divergência, que se mostra significativa no desempenho do fluxo de ar interno, não é capturada pelo  $C_p$  médio da fachada, ou seja, o uso desse valor como dado de entrada dos softwares de desempenho térmico pode ocasionar resultados equivocados.

Figura 4. Distribuição dos Cps nas superfícies do edifício no eixo central e no eixo de borda para (a) modelo 1- geometria simples (paralelepípedo) e (b) modelo 2 – edifício com sheds na cobertura (geometria complexa), para o ângulo de incidência dos ventos perpendicular ao edifício (0°)



Essa diferença ocorre principalmente devido à inclinação dos *sheds*, que possibilita o impacto direto do fluxo sobre a cobertura e, posteriormente, uma grande sombra de vento. Já no caso do paralelepípedo, a sua geometria simples forma uma única sombra de vento na cobertura, originária do fluxo de ar que incide na face a barlavento, gerando, Cps negativos ao longo de toda a superfície da cobertura. A região mais próxima da face a barlavento possui valores mais negativos, devido a maior velocidade do vento. À medida que vai se afastando dessa região e se aproximando da face a sotavento, os valores ficam menos negativos (Figuras 4 e 5). No modelo 2, os *sheds* na cobertura modifica esse comportamento. O vento externo tangencia totalmente o 1° *shed* com altas velocidades, apresentando Cps menos negativos. A inclinação do *shed* gera uma grande zona de separação junto às superfícies verticais, onde geralmente se localizam as aberturas dos edifícios com *sheds* (no gráfico essas regiões estão em destaque) e, assim, valores de Cps mais negativos, que favoreceriam a sucção do ar pela cobertura. Esse efeito ocasiona nitidamente uma sombra de vento no *shed* posterior (2° *sheds*), com recirculação do ar e, conseqüentemente, valores de Cps mais baixos. O mesmo ocorre no 3° *shed*, mas com velocidades mais baixas e, assim, os valores de Cp são maiores, ou seja, menos negativos (Figuras 4 e 5). Estes resultados mostram que uma mudança na geometria do modelo ocasiona desvios significativos na distribuição dos Cps na superfície dos edifícios. Isso implica que valores precisos de Cps nas geometrias complexas são cruciais para uma avaliação bem sucedida do desempenho do fluxo de ar interno. Na face a sotavento e nas laterais dos edifícios, os dois modelos apresentam comportamento muito similares, não possuindo nenhuma alteração significativa em função da mudança da geometria dos edifícios. O fluxo de ar que incide perpendicularmente na face a barlavento, contorna o edifício com altas velocidades, ocasionando sombras de vento nas duas laterais do edifício e, assim, reduz os valores de Cp nessas regiões. Em função disso, nota-se que esses valores são menores quanto mais próximos da face a barlavento. À medida que se aproxima da face a sotavento, os Cps ficam maiores, ou seja, menos negativos tendendo para valores positivos. Devido à incidência perpendicular dos ventos no edifício, os padrões de distribuição de Cps nessas superfícies são simétricos (Figura 5).

Figura 5. Vetores de velocidade nas superfícies do (a) modelo 1 e (b) modelo 2, para o ângulo de incidência dos ventos perpendicular ao edifício (0°)

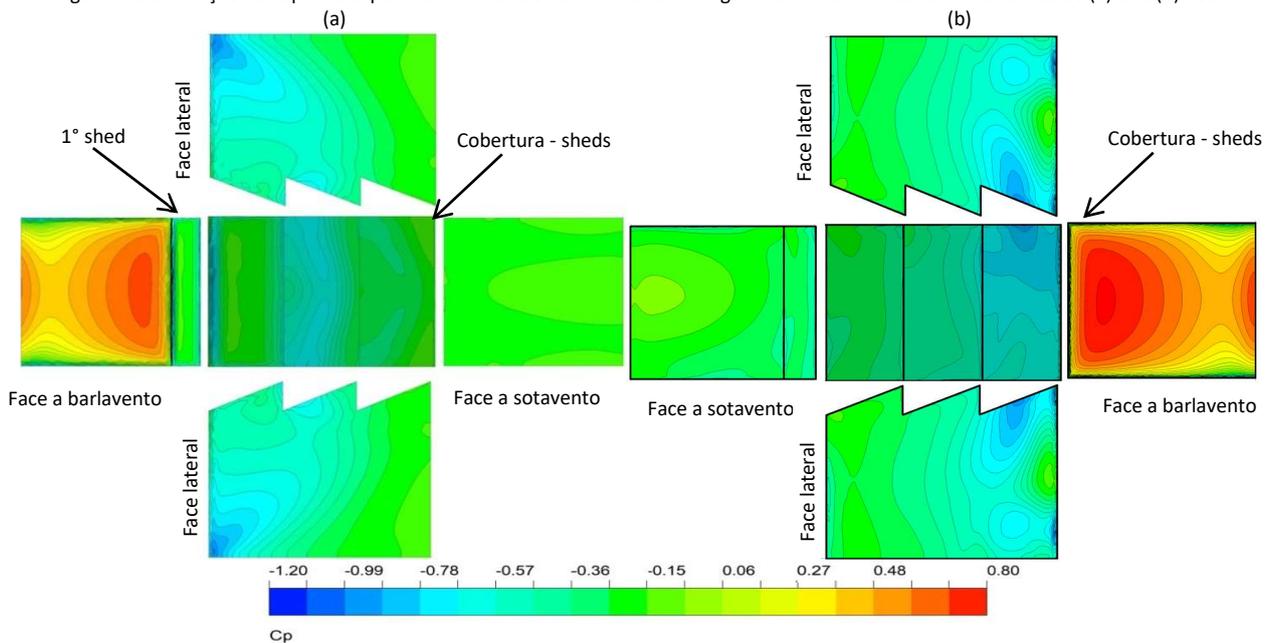


### Impacto do ângulo de incidência dos ventos nos valores de Cps na superfície no edifício com sheds na cobertura

Edifícios com *sheds* na cobertura podem funcionar como extratores ou como captadores de ar, dependendo da posição das aberturas em relação aos ventos dominantes. No caso dos *sheds* como extratores de ar, os ventos entram pelas aberturas na superfície lateral do edifício e, posteriormente, saem pelas aberturas na cobertura. Para os *sheds*

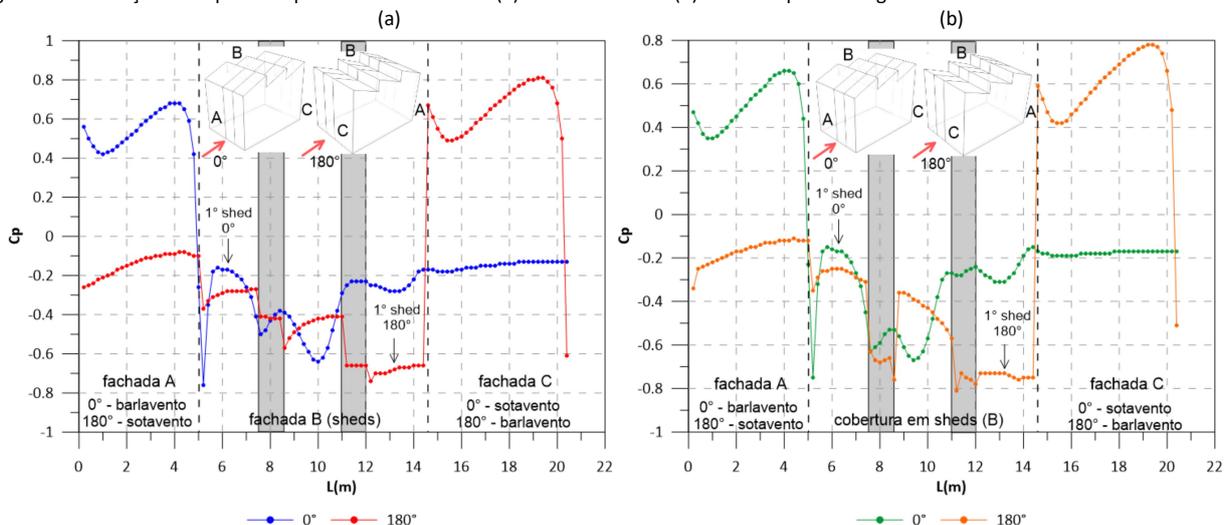
como captadores de ar, os ventos são captados pelas aberturas na cobertura. A seguir, a Figura 6 apresenta a distribuição dos  $C_p$  na superfície do edifício com *sheds* para os ângulos de incidência dos ventos externos de  $0^\circ$  e  $180^\circ$ . Nota-se claramente uma diferença na distribuição dos  $C_p$  em função do ângulo de incidência dos ventos, externos. O padrão de distribuição das pressões nas faces a barlavento apresenta comportamento similar para os dois ângulos de incidência analisados. No entanto, os valores de  $C_p$  no caso de  $180^\circ$  são superiores, tanto para o eixo central como para os eixos de borda. Nas superfícies laterais, ambas as situações apresentam comportamento muito similares: o fluxo de ar que incide perpendicularmente na face a barlavento, contorna o edifício com altas velocidades (na quina do edifício), ocasionando sombras de vento nas duas laterais do edifício e, conseqüentemente, tem-se uma redução dos valores de  $C_p$  nessas regiões. Em função disso, nota-se que esses valores são menores quanto mais próximos da face a barlavento. À medida que se aproxima da face a sotavento, os  $C_p$  ficam maiores, ou seja menos negativos tendendo para valores positivos. No entanto, há uma diferença em função do ângulo de incidência dos ventos. Na situação de  $180^\circ$  os valores mais negativos de  $C_p$  estão próximos à cobertura, em virtude da inclinação dos *sheds*, o que na situação de  $0^\circ$  são registrados na região inferior do modelo.

Figura 6. Distribuição dos  $C_p$  nas superfícies do modelo com *sheds* como ângulo de incidência dos ventos externos de (a)  $0^\circ$  e (b)  $180^\circ$



A Figura 7 avalia o impacto do ângulo de incidência dos ventos externos no edifício com geometria complexa, nos valores de  $C_p$ , para situação dos *sheds* como extratores (ângulo de  $0^\circ$ ) e captadores de ar (ângulo de  $180^\circ$ ).

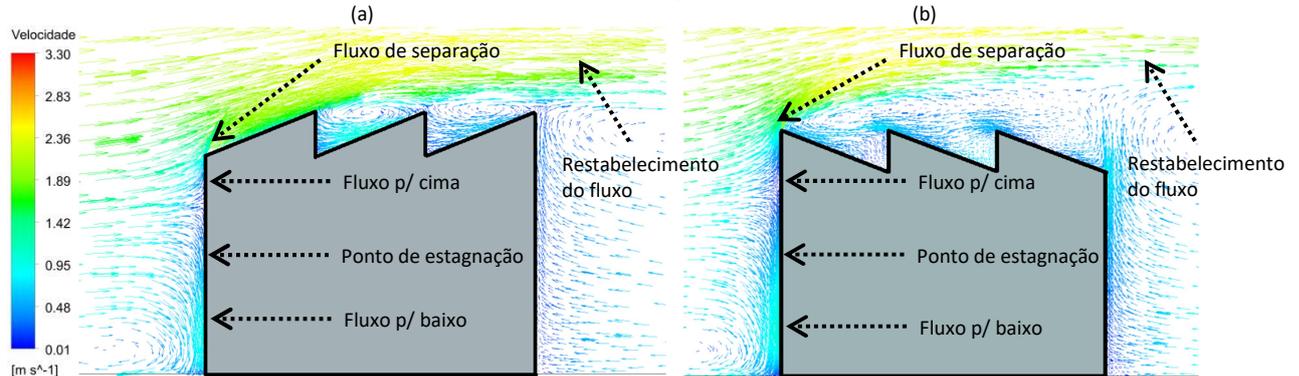
Figura 7. Distribuição dos  $C_p$  nas superfícies do edifício no (a) eixo central e no (b) de borda para os ângulos de incidência dos ventos de  $0^\circ$  e  $180^\circ$



Quando os ventos incidem no modelo a  $180^\circ$ , a fachada a barlavento registra valores superiores de  $C_p$ , em virtude da maior altura dessa fachada em relação ao caso de  $0^\circ$ , que tem 1,0m a menos devido à inclusão dos *sheds* na cobertura. A fachada posterior a sotavento, para as duas situações analisadas, registram valores de  $C_p$  negativos e muito similares, devido à sombra de vento e as regiões de recirculação do ar. Isso é notado pela Figura 8 que

representa os vetores de velocidade contornando as superfícies do edifício com *sheds* para 0° e 180°. Já a distribuição dos coeficientes de pressão na cobertura com *sheds* tem uma diferença significativa em relação à incidência dos ventos dominantes. Enquanto para o ângulo de 0° o primeiro dispositivo funciona como acelerador da velocidade obtendo valores de  $C_p$ s menos negativos, em função das altas velocidades do ar, nota-se para a situação de 180° uma grande sombra de vento, possibilitando valores de  $C_p$  significativamente mais baixos, com valores mais negativos, tanto para o eixo central quanto para o eixo de borda. Na situação de 180°, nota-se uma grande diferença na transição entre a fachada a barlavento e a cobertura, sendo que os valores de  $C_p$  registrados na parte superior da fachada a barlavento, próximo ao *shed*, foram da ordem de  $C_p = + 0.64$ , e o primeiro ponto registrado no *shed* foi de  $C_p = -0.75$ . Isso é ocasionado pelas altas velocidades do fluxo de ar que incide na face a barlavento, formando uma grande sombra de vento da cobertura com intensa zona de separação, provocando valores de  $C_p$  mais baixos (maior velocidade – menor pressão) (Figuras 7 e 8).

Figura 8. Vetores de velocidade nas superfícies do edifício com *sheds* para os ângulos de incidência dos ventos externos de (a) 0° e (a) 180°



Já nos *sheds* posteriores, esse efeito é menos intenso, devido à redução da velocidade dos ventos. Os  $C_p$ s continuam negativos devido à recirculação e a sombra de vento sobre a cobertura (Figuras 7 e 8). No entanto, à medida que se distancia da face a barlavento, os valores de  $C_p$  nos *sheds* são menos negativos. Isso também foi registrado para o ângulo de 0°. No entanto, nota-se uma grande diferença nos  $C_p$ s nas superfícies verticais da cobertura (região onde se localizariam as aberturas dos *sheds*), em destaque no gráfico (Figura 7). Na superfície vertical referente ao *shed* do meio, para a situação de 180° a sombra de vento gera valores significativamente menores que no caso a 0° (da ordem de  $C_p = - 0,7$  e  $C_p = - 0,3$  para 180° e 0°, respectivamente). Já na superior vertical posterior os valores são parecidos para os dois ângulos analisados, devido à redução do efeito da sombra de vento da cobertura. Ressalta-se que no caso da existência de aberturas nessas superfícies verticais, os valores de  $C_p$  encontrados indicam captação do ar apenas pelo dispositivo frontal a barlavento. O fluxo de ar incidente na cobertura com altas velocidades gera uma zona de separação com a formação de uma sombra de vento que ocasiona a queda dos valores de  $C_p$  nas regiões verticais dos *sheds* localizados na região posterior (valores de  $C_p$  negativos) e, conseqüentemente, ocasionaria a extração do ar.

## Conclusões

Esse artigo foi motivado pela falta de conhecimento sobre valores de  $C_p$ s médios do vento em construções geométricas complexas. Embora, muitos estudos sobre as distribuições médias de pressão do vento em edifícios foram realizados, a grande maioria desses estudos se concentrou em geometrias de edifícios simples, sem detalhes sobre edifícios com *sheds*, que são importantes porque alteram significativamente o padrão de fluxo de ar e a distribuição geral dos  $C_p$ s nas superfícies dos edifícios. Através dos resultados encontrados, constatou-se que a forma arquitetônica interfere diretamente na distribuição das pressões nas superfícies dos edifícios, assim como o ângulo de incidência dos ventos externos. Nota-se, claramente, a grande complexidade da distribuição dos  $C_p$ s ao longo da cobertura do edifício com *sheds*. Na fachada a barlavento, a meia altura da fachada, os valores de  $C_p$  se convergem apresentando valores muito similares para a geometria simples e a complexa. No entanto, ao longo do eixo da fachada, nota-se uma divergência em função das diferentes geometrias. A presença dos *sheds* na cobertura produz um perfil de  $C_p$  diferente ao longo da fachada, principalmente na região inferior e superior, registrando zonas de pressão mais baixas, causadas pela multiplicidade de áreas de separação de fluxo e recirculações induzidas pelos *sheds* na cobertura. Essa divergência não é capturada pelo  $C_p$  médio da fachada, comprovando que a adoção desse valor como dado de entrada dos *softwares* de desempenho térmico pode ocasionar resultados equivocados.

No caso do paralelepípedo, a sua geometria simples forma uma única sombra de vento na cobertura gerando  $C_p$ s negativos ao longo de toda a superfície da cobertura. Já a inclinação do *shed* gera uma zona de separação depressionária junto às superfícies verticais, onde geralmente se localizam as aberturas na cobertura com *sheds* e, assim, valores de  $C_p$ s mais negativos, que favoreceriam a sucção do ar pela cobertura. Esse efeito ocasiona nitidamente uma sombra de vento no *shed* posterior e, assim, valores de  $C_p$ s significativamente mais baixos.

Por fim notou-se uma diferença na distribuição dos Cps na cobertura do edifício com *sheds* em função do ângulo de incidência dos ventos externos. No caso a 0° a corrente de ar do primeiro dispositivo funciona como acelerador da velocidade, obtendo valores de Cps menos negativos em função das altas velocidades do ar, o que no caso de 180° tem-se uma grande sombra de vento, que possibilita valores de Cp significativamente mais baixos (valores mais negativos). Já nos *sheds* posteriores, esse efeito é menos intenso, devido à redução da velocidade dos ventos. Estes resultados mostram que a mudança na geometria do modelo e no ângulo de incidência dos ventos externos pode levar a desvios muito grandes na distribuição dos Cps na superfície dos edifícios. Isso implica que valores precisos de Cps para geometrias complexas são cruciais para avaliação do desempenho do fluxo de ar interno.

## Referencias

- Allard, F. (1998). Natural ventilation in buildings: a design handbook. London: James & James.
- Awbi, H. B. (1998). Ventilation of Buildings. London: E & FN Spon.
- Bittencourt, L. Cândido C. (2008). introdução à ventilação natural. Maceió: Edufal.
- Brandão, R. S. (2009). As interações espaciais urbanas e o clima. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Building Research Establishment. (1978). Principles of natural ventilation. BRE Digest n. 210. BRE, Garston.
- Calautit, J. K.; Hughes, B. R. (2014). Wind tunnel and CFD study of the natural ventilation performance of a commercial multi-directional wind tower. Building and environment, v. 80, p. 71-83.
- Cost (2004). Cost Action 14: Recommendations on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment. Bruxelas: COST.
- Cóstola D., Blocken B., Hensen J. L. M. (2009). Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs. Build Environ; 44:2027e36.
- Cóstola, D. (2006). Ventilação por ação do vento no edifício: procedimentos para quantificação. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Cóstola, D.; Alucci, M. P. (2011). Aplicação de CFD para o cálculo de coeficientes de pressão externos nas aberturas de um edifício. Revista ambiente construído, v. aa, n. 1, p. 145-158, jan. / mar.
- Crawley, D., Hand, J., Kummert, M., Griffith, B. (2008). Contrasting the capabilities of Building Energy Performance Simulation Programas. Building and Environment, v. 43, n. 4, p. 661-673.
- Delaunay D., Lakehal D., Pierrat D. (1995). Numerical approach for wind loads prediction on buildings and structures. J Wind Eng Ind Aerodyn; 57:307.
- Etheridge, D. W.; Sandberg, M. (1996). Building ventilation: theory & measure. Chichester: John Wiley & Sons.
- Franke J., Hellsten A., Schlünzen H., Carissimo B. (2007). Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment. Brussels.
- Harries, A. (2005). notas de aula. In: Workshop: CFX – FAU/USP. São Paulo.
- Karava P., Stathopoulos T., Athienitis A. K. (2004). Wind driven flow through openings e a review of discharge coefficients. Int J Vent; 3:255e66.
- Kim Y. C., Yoshida A., Tamura Y. (2012). Characteristics of surface wind pressures on low-rise building located among large group of surrounding buildings. Eng Struct; 35:18e28
- Levitan M. L., Mehta K. C., Vann W. P., Holmes J.D. (1991). Field measurements of pressures on the Texas tech building. J Wind Eng Ind Aerodyn; 38:227e34
- Leite, C. G. (2008). Alterações da ventilação urbana frente ao processo de verticalização de avenidas litorâneas: o caso da avenida litorânea de São Luís/MA. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Stathopoulos T., Zhu X. (1988). Wind pressures on building with appurtenances. J Wind Eng Ind Aerodyn; 31:265e81.
- Montazeri H., Azizian R. (2008). Experimental study on natural ventilation performance of one-sided wind catcher. Build Environ;43:2193e202.
- Orme, M. L. (1999). Applicable models for air infiltration and ventilation calculations: technical note 51: AIVC.
- Prata, A. R. (2005). Impacto da altura de edifícios nas condições de ventilação natural no meio urbano. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Stathopoulos T. (1999). Computational wind engineering: past achievements and future challenges. J Wind Eng Ind Aerodyn 1997;67e68:509e32.
- Uematsu Y., Isyumov N. Wind pressures acting on low-rise buildings. J Wind Eng Ind Aerodyn;82:1e25.
- Santamouris, M.; Wouters, P. (2006). Building ventilation: the state of the art. London: Earthscan.
- Tominaga Y., Mochida A., Yoshie R., Kataoka H., Nozu T., Yoshikawa M. (2008). AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. J Wind Eng Ind Aerod; 96(10e11):1749e61.
- Wit, S. (2001). Uncertainty in Predictions of Thermal Comfort in Buildings. Thesis (PhD thesis), School of Civil Engineering, University of Nottingham.