



## **AValiação de Coeficientes de Pressão em Edifícios em Meio Urbano Adensado**

**Renan Cid Varela Leite (1); Anésia Barros Frota (2)**

(1) Arquiteto, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, [renancid@bol.com.br](mailto:renancid@bol.com.br)

(2) Doutora, Professora da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, [arfrota@uol.com.br](mailto:arfrota@uol.com.br)

Universidade de São Paulo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética, Rua do Lago, 876, São Paulo, 05508-080.

### **RESUMO**

Coeficientes de pressão ( $C_p$ ) constituem um dos principais parâmetros no estudo da ventilação natural por ação dos ventos e constituem dados de entrada em vários programas de simulação do desempenho térmico de edificações, mais especificamente o *EnergyPlus* através de sua interface gráfica, o *DesignBuilder*. No entanto, nos dois programas, as bibliotecas padrão somente fornecem valores adequados de  $C_p$  para as fases iniciais do processo de projeto, uma vez que assumem dados gerais oriundos de pesquisas em túnel de vento que utilizam um edifício isolado. Apesar de diversos trabalhos sobre a avaliação  $C_p$  disponíveis, a existência de modelos paramétricos e mesmo alguns algoritmos simplificados para prever coeficientes de pressão devido ao vento, a aplicabilidade de tais dados é reduzida devido à complexidade da variação de  $C_p$ , em especial o efeito de obstáculos adjacentes. O objetivo deste artigo é discutir os dados de  $C_p$  obtidos através de simulações CFD específicas sobre as fachadas de um edifício residencial em oito configurações urbanas diferentes e em relação aos níveis de adensamento construtivo propostos. Metodologicamente são apresentados os cenários formulados e discutidas as características de malha adotadas, o modelo de turbulência utilizado e as condições de contorno impostas às simulações. Os resultados indicam a variação de  $C_p$  de acordo com a altura em relação ao solo e níveis de densificação urbana propostos. O espaçamento entre edificações e a forma do entorno provaram ser significativos para a alteração dos valores de  $C_p$ . Cada configuração urbana específica resulta em variações significativas de  $C_p$ , o que reforça a necessidade de simulação e/ou realização de ensaios para a determinação das condições de ventilação natural.

Palavras-chave: coeficientes de pressão, adensamento urbano, forma urbana.

### **ABSTRACT**

Pressure coefficients ( $C_p$ ) are key parameters to study wind induced natural ventilation and input data for several thermal performance simulation programs, namely *EnergyPlus* thru its graphical interface *DesignBuilder*. However, in both programmes, standard templates only provide accurate  $C_p$  values for initial design stages once it assumes general data from wind tunnel technique using an isolated building. Although several researches about  $C_p$  evaluation are available, the existence of parametrical models and even simplified algorithms to predict wind pressure coefficients, the applicability of such data is reduced due to  $C_p$  variation and complexity, specifically the effect of adjacent buildings. The aim of this paper is to discuss  $C_p$  data gathered thru specific CFD simulations performed over a residential building's facades within eight different urban situations and in relation to proposed urban density levels. Methodologically the urban scenarios used are presented and discussed the adopted mesh characteristics, turbulence model applied and imposed boundary conditions. Results indicate the  $C_p$  modification in accordance to height above ground and proposed urban densification levels. Space between buildings and surroundings form are significant to change  $C_p$  values. Each urban configuration leads to significant  $C_p$  modification, which reinforces the need of simulation and/or tests in wind tunnel.

Keywords: pressure coefficients, urban densification, urban form.

## 1. INTRODUÇÃO

Valores de coeficientes de pressão ( $C_p$ ) constituem um dos principais parâmetros envolvidos no estudo da ventilação por ação dos ventos, sendo dado de entrada em diversos programas de desempenho térmico, entre eles o *EnergyPlus*, através de sua interface gráfica, o *DesignBuilder*.

Apesar de diversos trabalhos sobre a avaliação  $C_p$  disponíveis atualmente, a existência de modelos paramétricos e mesmo algoritmos simplificados para prever coeficientes de pressão, a aplicabilidade de tais dados é reduzida devido à complexidade da variação de  $C_p$  em relação ao ângulo de incidência, a geometria da edificação, sua posição específica na fachada e, sobretudo, o efeito dos obstáculos adjacentes.

Alternativamente, programas de dinâmica dos fluidos computadorizada, conhecidos pela sigla CFD, constituem valiosa ferramenta para obtenção de dados de  $C_p$ , como atestado em diversos estudos recentes (NISHIZAWA et al, 2003; BURNETT et al, 2005; HIRANO, 2006; LAM et al, 2008; CHENG et al, 2008; CÓSTOLA; ALUCCI, 2011; SHEN et al, 2012). Vantagens como a redução dos custos e o tempo em comparação a ensaios em túnel de vento reforçam a viabilidade da técnica para estudos de ventilação natural.

Na presente pesquisa um programa CFD é utilizado para simular as condições de ventilação natural na escala urbana e calcular valores de  $C_p$  sobre as fachadas de um edifício residencial adotado como modelo. A proposta é obter dados de  $C_p$  de acordo com cada configuração de adensamento urbano testada para, posteriormente, inseri-los no programa de desempenho térmico utilizado e calcular, adequadamente, a performance da ventilação natural nas unidades habitacionais.

No *EnergyPlus*, um dos principais programas de cálculo do desempenho termoenergético de edificações, e através de sua interface gráfica, o *DesignBuilder*, é possível inserir manualmente os valores de  $C_p$  para as oito principais direções de vento em intervalos de incidência a cada  $45^\circ$ . A medida evita a adoção dos valores programados e que são oriundos das pesquisas de AIVC (1984), amplamente utilizados em programas do tipo. A publicação reúne uma série de tabelas de coeficientes de pressão para edifícios baixos (até três pavimentos) e, para o caso de edifícios altos, estão disponíveis apenas perfis verticais de  $C_p$  em quatro níveis de obstrução. Entretanto, como advertem Cóstola; Blocken; Hensen (2009), a adoção de um perfil vertical pode levar a interpretações equivocadas da distribuição dos  $C_p$ s sobre uma superfície, pois pode omitir variações muitas vezes significativas, induzindo a erros nos cálculos de vazão de ar.

A utilização dos dados resultantes das pesquisas de AIVC (1984) pode, portanto, comprometer os valores de coeficientes de pressão para as diferentes situações de adensamento urbano avaliadas na presente pesquisa, que utiliza edifícios altos em meio obstruído por outras construções. Nesse sentido busca-se, através de simulações utilizando a técnica CFD, determinar valores de  $C_p$  para a fachada do edifício modelo de acordo com cada cenário de ocupação do solo.

Foram realizadas simulações para oito diferentes cenários urbanos simplificados com densidades variando entre 80 e 640 hab/ha. As análises da ventilação natural em cada cenário testado consideram as oito principais direções de vento, totalizando 64 simulações. O artigo apresenta os principais resultados alcançados na determinação de  $C_p$  e a alteração no comportamento dos fluxos devido à forma urbana.

## 2. OBJETIVO

Avaliar os resultados de  $C_p$  obtidos sobre as fachadas de um edifício residencial em oito configurações urbanas diferentes e discutir sua variação em relação aos níveis de adensamento construtivo propostos.

## 3. MÉTODO

Os procedimentos adotados para determinar os dados de  $C_p$  sobre as fachadas do edifício modelo são apresentados sucintamente, uma vez que o objetivo deste artigo é discutir os resultados em relação às principais incidências de vento e o comportamento dos fluxos em cada um dos oito cenários de ocupação do solo. Entretanto, as características determinadas para o processamento das simulações computacionais constituem parte fundamental na avaliação da qualidade dos resultados alcançados. Portanto, metodologicamente são apresentadas as principais etapas percorridas:

1. Os cenários de ocupação do solo avaliados;
2. A geração de malhas adequadas ao cálculo de  $C_p$ ;
3. O modelo de turbulência adotado;
4. A determinação das condições de contorno.

Como resultado, os valores de  $C_p$  são discutidos em relação aos níveis de adensamento propostos.

O cálculo dos coeficientes de pressão é realizado através do programa ANSYS CFX em sua versão 14.0. O Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética (LABAUT) possui licença educacional

para calcular as simulações utilizando um computador Core i7 com 8 GB RAM. As simulações foram realizadas utilizando toda a capacidade de processamento disponível visando alcançar mais rapidamente os resultados e garantir a melhor relação possível entre densidade e qualidade das malhas geradas.

### 3.1 Os cenários avaliados

Os cenários de ocupação do solo foram confeccionados tomando como base a legislação urbana de Fortaleza e as prescrições determinadas à Zona de Ocupação Preferencial (ZOP) 1, em que é permitido um maior adensamento construtivo de acordo com o PDPFor (FORTALEZA, 2009).

A geometria dos cenários é simplificada em razão da capacidade computacional disponível e como forma de representar uma maior variedade de formas urbanas. Na confecção dos cenários foram utilizadas nove quadras urbanas típicas (100m x 100m) em um arranjo de 3 x 3. Na quadra central do conjunto utilizou-se todo o potencial construtivo, elevando-se ao máximo a altura das edificações (72 m) e aplicando o índice de aproveitamento permitido, considerando, também, características comuns ao mercado imobiliário local. O edifício modelo possui pavimento com cerca de 300 m<sup>2</sup> de área, sendo cada uma das 4 unidades residenciais de 70 m<sup>2</sup>, aproximadamente. Como resultado, foi possível inserir quatro edifícios modelo para as simulações de desempenho térmico e ventilação natural. Os edifícios estão voltados para leste, forma de implantação recorrente. A tipologia é comum, com paredes de alvenaria revestidas por elementos cerâmicos de cor clara.

Nas oito demais quadras a ocupação do solo variou em função dos recuos, taxa de ocupação e gabarito para testar diferentes morfologias urbanas. Os níveis de densidade são expressos em habitantes por hectare. Fixou-se a taxa de ocupação em 60% do lote variando as dimensões deste de um cenário para outro e considerando famílias constituídas por 3 pessoas (IBGE, 2011). Distribuiu-se uma residência unifamiliar em cada lote nos cenários 1, 3 e 5 e duas famílias nos cenários 2 e 4, sendo possível elevar a ocupação de acordo com a tipologia construtiva adotada nos cenários 6, 7 e 8 para 8, 12 e 16 famílias, respectivamente (figura 1).

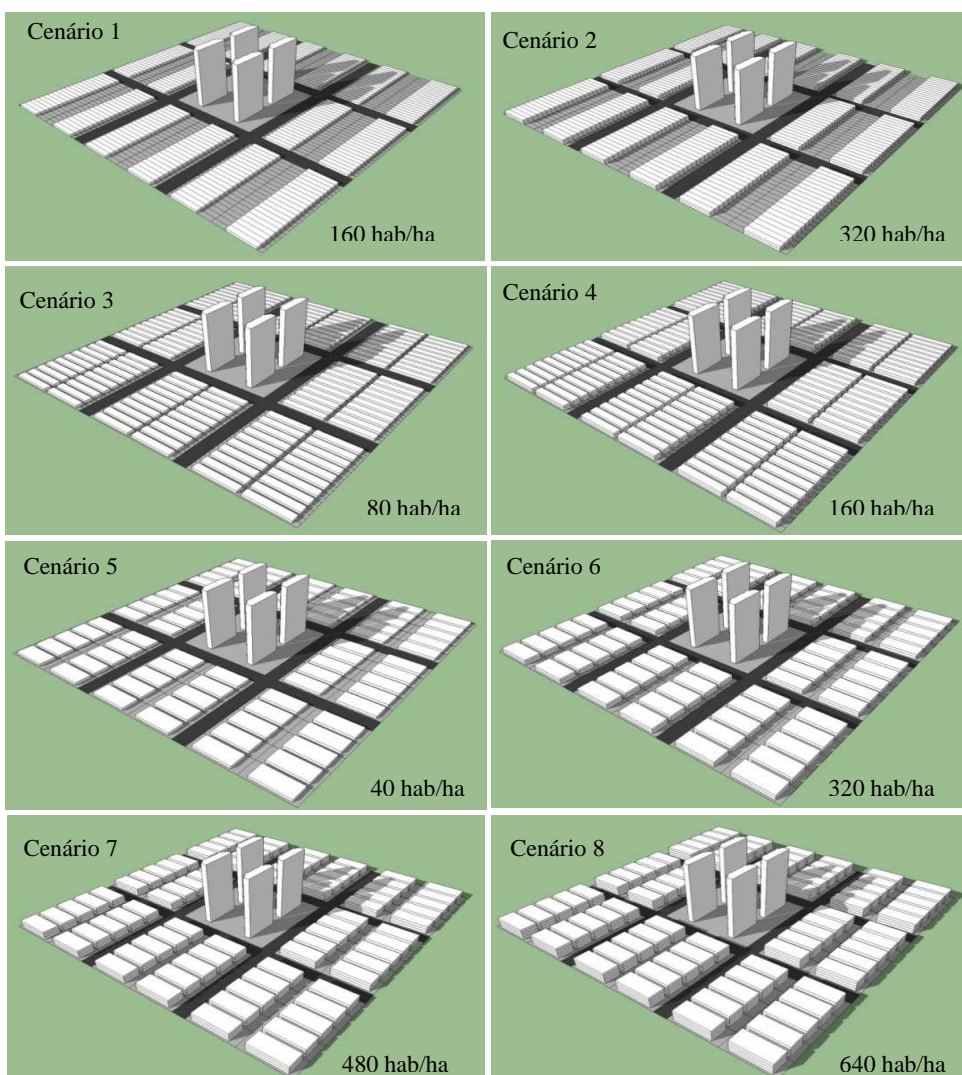


Figura 1 - Cenários de ocupação do solo e diferentes níveis de adensamento avaliados

### 3.2 Malhas geradas

Para as simulações do comportamento da ventilação natural em meio urbano foram geradas malhas compostas por elementos tetraédricos em formação desestruturada. A opção por este tipo de malha deve-se à agilidade na sua geração, uma vez que o programa produz automaticamente as características dos elementos, adequando-os mais facilmente à geometria.

Optou-se por um domínio em formato octogonal para que as oito principais direções de vento pudessem ser simuladas, como mostra a figura 2. Os domínios utilizados possuem 1030,56 m de lado e 360 m de altura em função da inserção do edifício modelo, com 72 m de altura.

Camadas de elementos prismáticos foram adicionadas ao piso do domínio, aos edifícios modelo e aos que compõem o entorno deste. O objetivo dos prismas é apreender os efeitos de desprendimento da camada limite no contato com os obstáculos inseridos no domínio, como indica a figura 3.

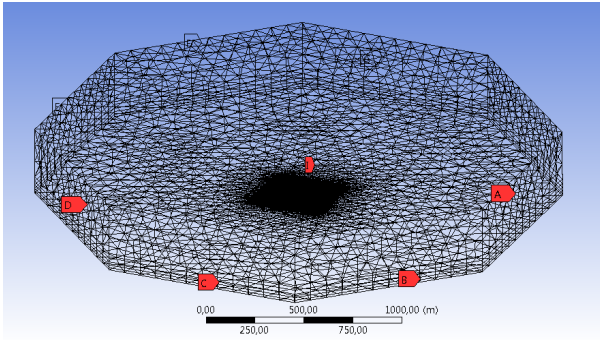


Figura 2 – Malha gerada para o domínio octogonal utilizado

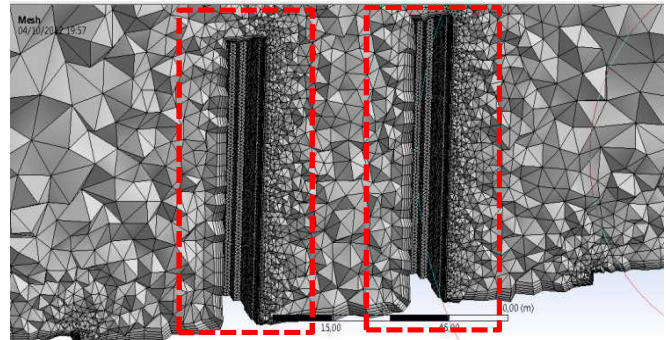


Figura 3 - Seção da malha e detalhe da camada de prismas sobre os edifícios modelo

#### 3.2.1 O valor de $y_{plus}$

Como forma de atingir resultados adequados em função do modelo de turbulência adotado, o valor de  $y_{plus}$ , parâmetro adimensional que mede a distância da primeira camada de prismas até a parede do obstáculo, foi planejado de acordo com os valores indicados em literatura (BLOCKEN, STATHOPOULOS E CARMELIET, 2007; COSTOLA; ALUCCI, 2011). A camada de prismas foi dimensionada tendo em vista a adoção do modelo  $K - \epsilon^1$  padrão, que admite o valor de  $y_{plus}$  entre 30 e 300, com aceitação de níveis até 1.000 para apreender, adequadamente, os fenômenos de camada limite.

No entanto, atingir valores abaixo de 1.000 nas superfícies do edifício modelo apresentou problemas para a maioria das simulações, tendo os intervalos situados entre 500 e 2.500. Por outro lado, priorizou-se o fechamento de todas as simulações dentro de valores de resíduos aceitáveis (abaixo de  $1 \times 10^{-4}$ ), sem recorrer a utilização de escalas de tempo de cálculo muito reduzidas, que podem comprometer a precisão da solução. Salienta-se, ainda, a realização de testes de independência da malha para cada cenário analisado como forma de garantir que a precisão dos resultados é a mesma diante de densidades e refinamentos diferentes.

### 3.3 O modelo de turbulência adotado

As simulações adotaram o modelo de turbulência  $K - \epsilon$  padrão. Hargreaves; Wright (2007) descrevem que este modelo é bastante comum em pesquisas relacionadas ao comportamento de fluidos, apesar dos avanços na capacidade computacional e a utilização crescente de outros modelos de turbulência, como *Large Eddy Simulation* (LES). O próprio tutorial do ANSYS-CFX ressalta a boa relação entre os cálculos computacionais (tempo e capacidade) e a precisão dos resultados.

Em geral, a robustez do modelo  $K - \epsilon$  aumenta as chances de fechamento da simulação, como indicado pela literatura e as experiências acumuladas utilizando este modelo (MARUYAMA, 1999; CHENG et al, 2008; CÓSTOLA; ALUCCI, 2011). Tentativas utilizando modelos como RNG  $K - \epsilon$  e SST não produziram resultados satisfatórios, com convergências pobres ou valores de  $y_{plus}$  distantes do adequado.

Realizando um teste inicial para o cenário 1, os valores de  $C_p$  com o modelo  $K - \epsilon$  situaram-se entre -0,73 e 1,01. A simetria, comparando-se os contornos de  $C_p$  para os dois edifícios modelo, apresentou-se como esperado. Nas laterais são verificados valores negativos e em parte do topo, próximo aos limites com a fachada frontal. Próximo aos cantos, valores mínimos e negativos devido ao efeito de borda (ver figura 6).

<sup>1</sup> O modelo de turbulência  $K - \epsilon$  padrão, utiliza duas equações de transporte que são calculadas para determinar o valor da energia cinética turbulenta ( $k$ ), definida como a variação nas flutuações da velocidade, e a sua taxa de dissipação ( $\epsilon$ ).

### 3.4 As simulações realizadas

#### 3.4.1 Condições de contorno impostas

Em virtude da quantidade considerável de análises a serem realizadas pela pesquisa, as simulações de ventilação natural foram consideradas em condição estacionária, isotérmica, incompressível e turbulenta.

Ao piso e edifícios presentes no modelo foi imposta a condição de não escorregamento enquanto que o topo foi considerado livre de atrito. As oito faces que compõem o domínio octogonal foram configuradas como aberturas e a velocidade foi atribuída através de componentes cartesianas, sendo possível alterar o seu valor através da edição do arquivo de linguagem de comando do programa (ccl). Os valores de velocidade inicial foram calculados com base no diagnóstico das condições de vento para a cidade, obtidos através da organização dos dados presentes no arquivo climático da estação meteorológica localizada no Aeroporto Pinto Martins, em Fortaleza, para o período entre 2002 e 2011.

Foi utilizada a equação 1 para corrigir o perfil vertical de velocidade de acordo com a posição no interior do domínio considerando a situação de área urbana, onde os coeficientes  $k$  e  $a$  correspondem a 0,35 e 0,25, respectivamente. A medida visa impor uma alteração ao vento devido à rugosidade do meio urbano.

$$V = v_{ref} k x z^a \quad (\text{Equação 1})$$

$V$  = velocidade média do vento à determinada altura (m/s);

$v_{ref}$  = velocidade média do vento na estação meteorológica registrada a 10 m (m/s);

$z$  = altura determinada (m);

$k, a$  = coeficientes segundo a rugosidade da superfície do terreno.

#### 3.4.2 O monitoramento da solução

Além da análise do nível de resíduos gerado durante o cálculo das simulações, todas programadas para finalizar ao atingir valores abaixo de  $1 \times 10^{-4}$  ou após 300 iterações (figura 4), a convergência foi verificada através de pontos de monitoramento inseridos. O objetivo da inserção destes é avaliar se a física envolvida na análise está condizente com a realidade esperada.

Nos pontos de monitoramento são verificados valores de interesse inseridos através de equações e, em análises em regime estacionário, a estabilidade dos valores indica a precisão dos resultados. A vazão total e a pressão nas paredes dos edifícios foram sendo verificadas ao longo das simulações.

Como se observa na figura 5, inicialmente o valor da pressão nas paredes dos edifícios oscila, estabilizando-se após cerca de 40 iterações. A vazão, mais sensível aos cálculos, estabiliza-se praticamente desde o início. Ambas reforçam a qualidade dos resultados obtidos na simulação.

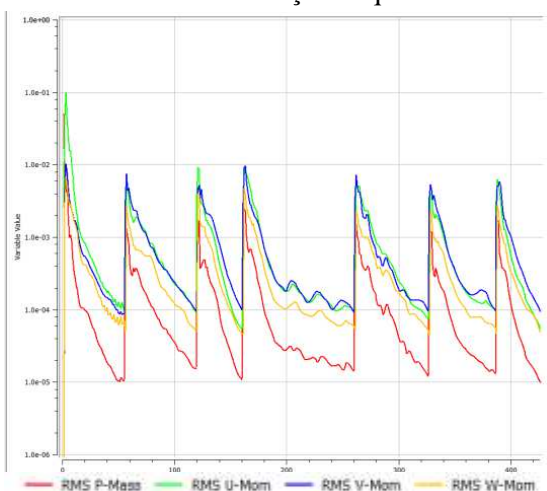


Figura 4 – Níveis de resíduos ao final da série de oito simulações para cada cenário

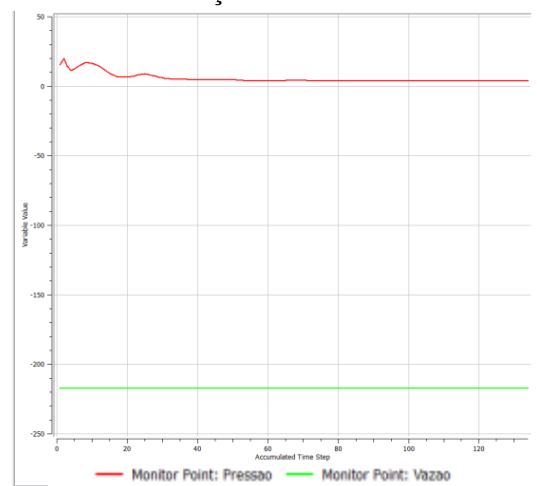


Figura 5 – Convergência da simulação através dos pontos monitoramento de pressão sobre as superfícies e vazão

#### 3.4.3 Cálculo de $C_p$ em modelos selados

Nas simulações para o cálculo de  $C_p$  sobre as fachadas o edifício é considerado como um modelo selado, vedado. A adoção de aberturas implica na alteração significativa do campo de pressões sobre as superfícies e, conseqüentemente, elevam a necessidade por processamento computacional.

A medida somente é possível, entretanto, devido à baixa porosidade do edifício modelo utilizado, pois como adverte Straaten (1967) apud Carrilho da Graça et al (2002), para casos em que as áreas de abertura

situam-se acima de 20% da área de fachada, é inadequado desassociar a simulação de fluxos internos da verificação das condições de ventilação externa. Bittencourt & Candido (2005) concordam que valores de  $C_p$  obtidos com base em ensaios em túnel de vento utilizando modelos sólidos são confiáveis apenas para edifícios com porosidade até 20%. Aynsley (1988) apud Bittencourt & Candido (2005) vai mais adiante e acrescenta que a utilização de modelos fechados para determinar valores de  $C_p$  é possível apenas para casos com taxas de ventilação reduzidas e formas comuns de edifícios com porosidade inferior a 25%.

A dimensão das janelas do edifício modelo foi ampliada segundo o prescrito pelo Código de Obras e Posturas do Município de Fortaleza (FORTALEZA, 1981). A área de abertura das janelas dos pontos de interesse (suíte do casal, dormitório 01 e sala) e demais ambientes é apresentada a seguir na tabela 1.

Tabela 1– Dimensionamento das janelas de acordo com a área de piso segundo o Código de Obras de Fortaleza

Ambiente	Área de piso (m <sup>2</sup> )	Área mínima de ventilação (m <sup>2</sup> ) (1/6 da área do piso)
Suíte casal	11,28	1,88
Suíte filhos	7,08	1,18
Sala estar/jantar	17,05	2,84
TOTAL (m <sup>2</sup> )	35,41	5,90

As janelas da suíte do casal, suíte 1 e sala de estar/jantar, localizadas na fachada principal, totalizam 5,90 m<sup>2</sup>. As áreas de janela dos quatro apartamentos somam 23,60 m<sup>2</sup>. Uma vez que a área de fachada total por pavimento é de 106,08 m<sup>2</sup>, o edifício apresenta razão entre área de janelas e paredes de 22,24%.

No entanto, é fundamental salientar que o valor da razão entre a área de abertura e a fachada, conhecida pela sigla W.W.R. (*window wall ratio*), trata do aproveitamento da luz natural através de janelas, aspecto diferente para o aproveitamento da ventilação natural. Uma vez que a área de abertura varia de acordo com o tipo de janela, a porosidade do edifício também sofre alterações. Em RTQ – R (2012) p. 12 a porosidade é definida como a “relação entre as áreas efetivamente abertas para ventilação e as áreas impermeáveis à passagem do vento”, o que reforça a diminuição do percentual de acordo com a tipologia adotada. No caso, se utilizam janelas de correr que permitem a passagem em 50% do vão, aproximadamente.

O coeficiente de pressão foi inserido como uma expressão (equação 2), e, após as simulações, uma variável era inserida no módulo para visualização dos resultados, determinando valores de  $C_p$  sobre as superfícies dos edifícios em cada cenário. Ainda, um ponto foi localizado antes da perturbação do fluxo em cada direção de vento testada para determinar a velocidade de referência utilizada no cálculo.

$$C_p = \frac{P_x}{\rho \cdot v_{ref}^2} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$P_x$  é o ponto de interesse na fachada

$\rho$  é a massa específica do ar (kg/m<sup>3</sup>)

$v_{ref}$  é a velocidade do ar (m/s)

Os pontos de interesse do valor de  $C_p$  estão localizados no centro das janelas dos apartamentos no primeiro pavimento e no vigésimo terceiro (penúltimo), como indica em detalhe a figura 6. A opção por estas unidades específicas deve-se à metodologia adotada para avaliação do desempenho térmico, a ser realizado em outra etapa. Os resultados de  $C_p$  nestes pontos foram, então, exportados para uma planilha eletrônica.

O ponto 1 corresponde à janela da suíte do casal, o ponto 2 à janela da suíte dos filhos e o ponto 3 à janela da sala. Na fachada posterior, um ponto foi inserido na janela do wc e outros dois nas janelas da área de serviço (A.S.1 e A.S. 2). A análise dos resultados é feita para cada ponto e por pavimento.

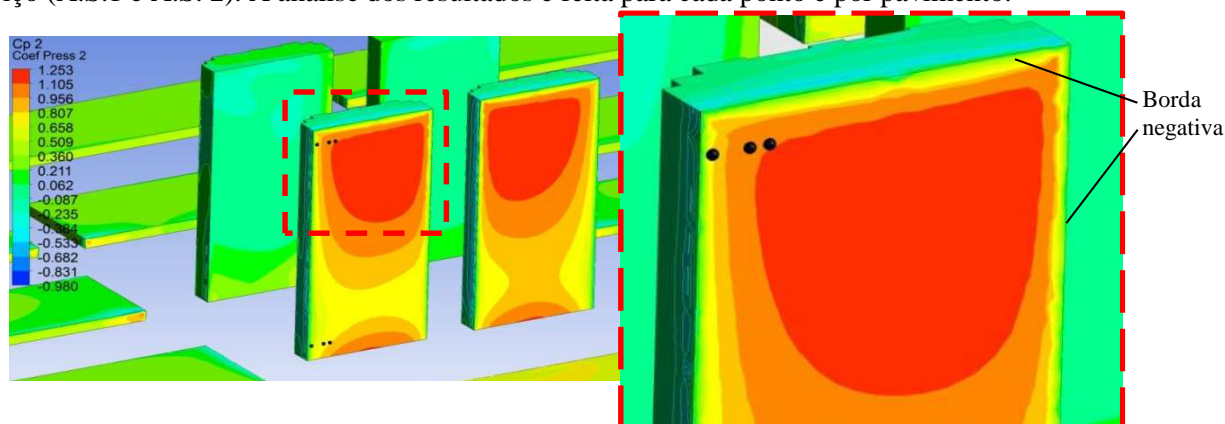


Figura 6 – Detalhe da inserção de pontos no centro das janelas da sala, dormitório e suíte do casal nos pavimentos 1 e 23 para cálculo dos  $C_p$ s na fachada a barlavento do edifício modelo.

## 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Apesar de simuladas todas as direções de vento, a discussão dos resultados avalia, especificamente, as principais incidências do vento local evidenciadas pelo diagnóstico climático, que indicou a predominância das orientações leste, sudeste e sul com 44%, 34% e 16%, respectivamente. Os resultados para as demais incidências, que somaram cerca de 6% apenas, serão analisadas em outra oportunidade.

### 4.1. Coeficientes de pressão para o vento leste

Os valores de  $C_p$  variaram dentro do esperado na maioria dos cenários com o vento leste. A incidência perpendicular à fachada principal permite avaliações mais diretas. No cenário 1, mais desobstruído e sem espaçamento entre edificações, os valores apresentam-se mais elevados do que nos demais cenários. A maior perturbação do fluxo nos demais modelos de ocupação do solo diminui a intensidade do vento e, consequentemente, o campo de pressões sobre a fachada. A zona de pressão negativa na fachada posterior comporta-se como esperado, uma vez que corresponde a uma região de vórtices e desaceleração dos fluxos.

A maior complexidade na geometria dos cenários aumenta a perturbação dos fluxos, porém, nem sempre os valores são diminuídos com a elevação nos níveis de densidade. Como se observa no caso do cenário 4, em que a aceleração dos fluxos entre as edificações do entorno, mais altas (6 m), acabam gerando uma maior pressão sobre a fachada do edifício modelo em comparação ao cenário 3.

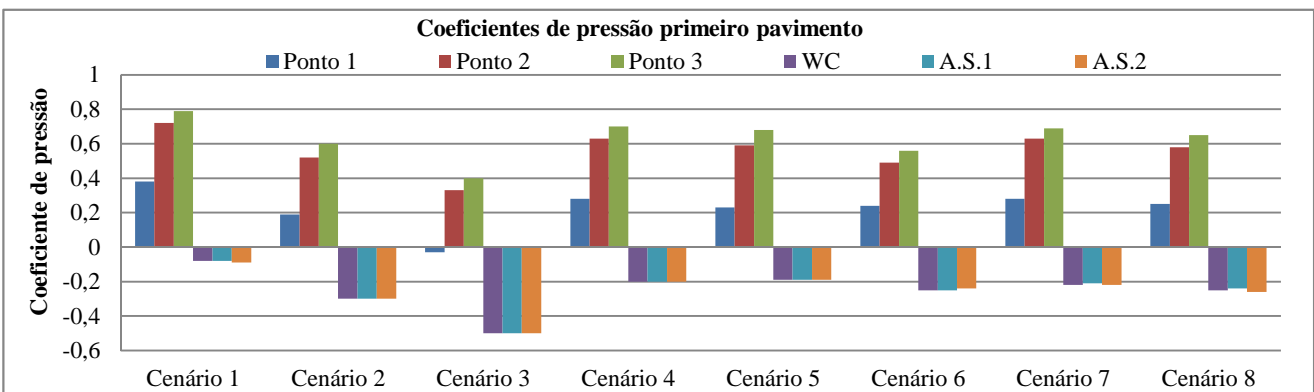


Figura 7 – Coeficientes de pressão para o primeiro pavimento com vento leste

O mesmo efeito de canalização dos fluxos que ocorre com a elevação na altura das edificações ao manter-se o mesmo afastamento entre estas, criando uma espécie de *canyon* urbano de pequenas proporções, eleva a pressão incidente sobre a fachada principal nos cenários 7 e 8 em relação aos cenários 4 e 5, sobretudo em relação ao  $C_p$  no ponto 1. Como forma de medir tal alteração foram inseridos três pontos no espaço entre os edifícios, conforme indica a figura 8. Os valores de velocidade do ar obtidos para estes pontos reforçam a aceleração do fluxo ao adentrar o espaço entre as edificações do entorno, imediatamente após o estrangulamento e na região à frente do edifício modelo, como demonstra a figura 9.

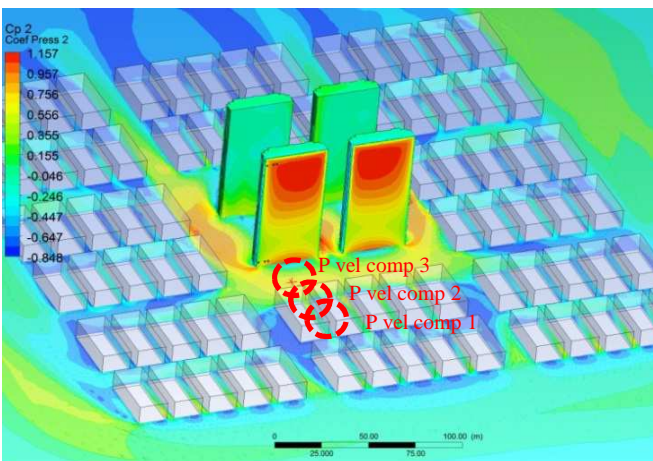


Figura 8 – Localização de pontos de verificação da velocidade do ar no estreitamento entre edifícios inseridos

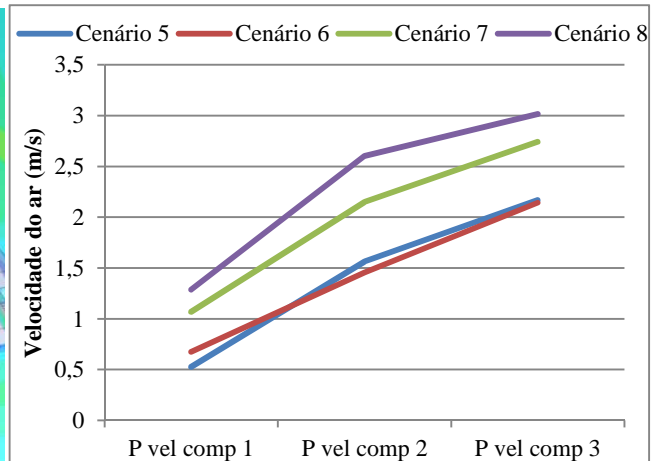


Figura 9 - Valores de velocidade do ar medidas nos pontos de comparação

Para o vigésimo terceiro pavimento, os valores de  $C_p$  apresentam-se mais elevados em comparação ao primeiro pavimento, uma vez que a influência da rugosidade é menor e o efeito de obstáculos é menos perceptível. Da mesma forma verificada no primeiro pavimento, os valores tendem a ser mais elevados à medida que se afastam dos cantos do edifício, onde o efeito de borda tende a diminuir a pressão (figura 10).

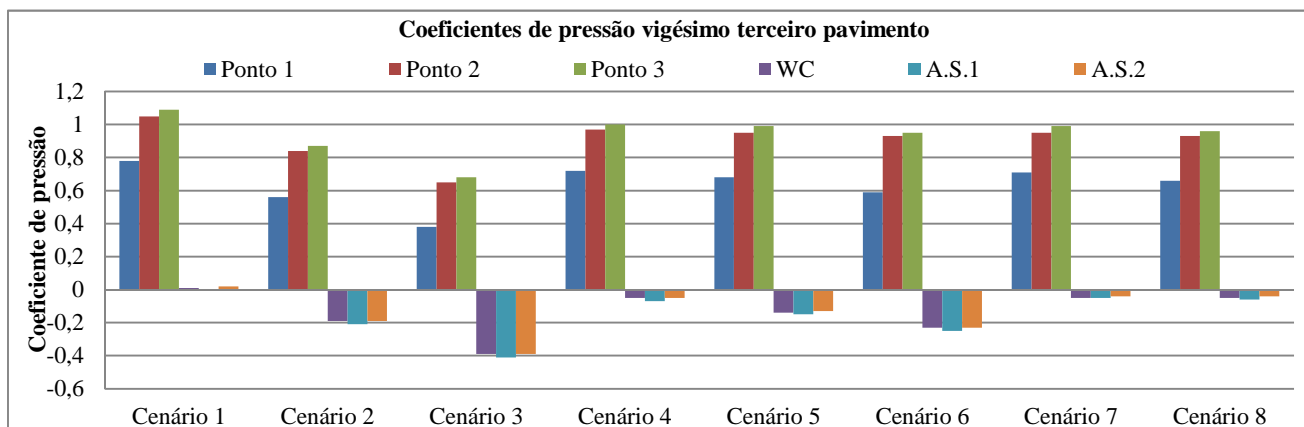


Figura 10 - Coeficientes de pressão para o vigésimo terceiro pavimento com vento leste

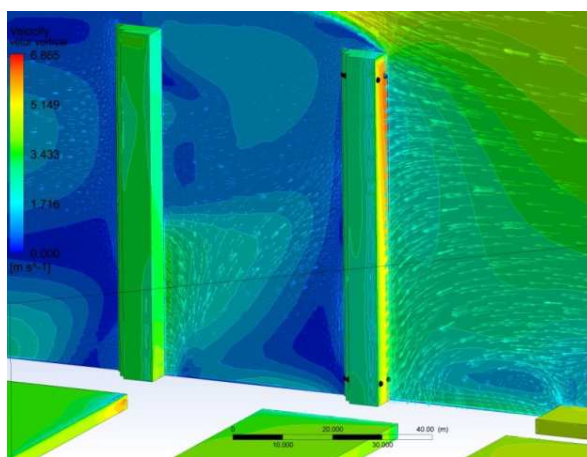


Figura 11 – Zona de vórtices e redirecionamento dos fluxos para cima.

A presença de uma zona de valores positivos mesmo na fachada a sotavento no cenário 1 foi verificada através de um plano vertical de velocidades. O que se observa na figura 11, a seguir, é uma zona de recirculação localizada na região do vórtice formado entre o primeiro edifício modelo e o segundo. O efeito direciona alguns dos fluxos para cima, minimizando a intensidade da zona de sucção na parte superior da fachada posterior do edifício, o que resulta em valores baixos, mas positivos, de 0,01 e 0,02, por exemplo. Na parte mais baixa, no entanto, a zona de sucção apresenta-se mais evidente, como se observa no trecho em azul escuro, conformando uma área de valores negativos de  $C_p$ , entre -0,10 e -0,50.

## 4.2. Coeficientes de pressão para o vento sudeste

A posição das janelas das unidades habitacionais avaliadas, localizadas no canto esquerdo do edifício modelo, indicam valores mais elevados de  $C_p$  em relação aos do vento de leste.

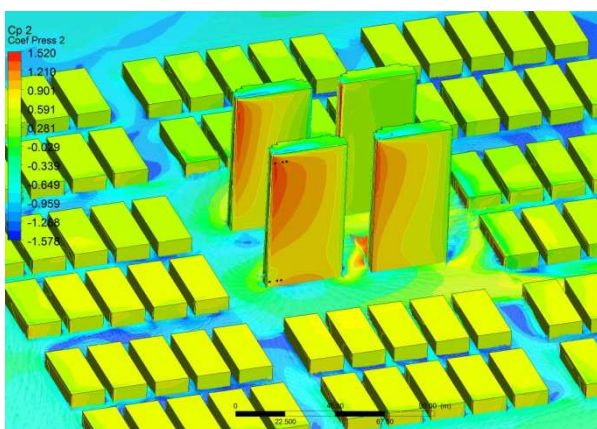


Figura 12 – Contornos de  $C_p$  sobre os edifícios modelo com vento de sudeste

Apesar da região de  $C_p$  mais elevado localizar-se em um trecho significativamente menor em comparação à condição de vento perpendicular à fachada, é justamente sobre as janelas analisadas que este trecho está localizado, o que leva a elevação nos valores registrados, como evidencia a figura 12.

De maneira geral, os valores de  $C_p$  diminuem com o aumento da complexidade das relações de ocupação do solo a partir do cenário 2, atingindo menores valores no cenário 3, onde a densidade é relativamente baixa, porém com maior alteração dos fluxos devido ao maior espaçamento entre edificações.

O efeito de aceleração que ocorreu com o vento perpendicular à fachada (leste) não apresenta a mesma intensidade nas simulações com vento a  $135^\circ$  (sudeste).

A primeira vista, os valores do cenário 6 apresentam-se demasiadamente elevados em relação aos demais (cenário 5, 7 e 8), devendo ser recalculados por apresentar, aparentemente, problemas de imposição das condições de contorno e/ou configuração de malha, como é possível observar na figura 13.



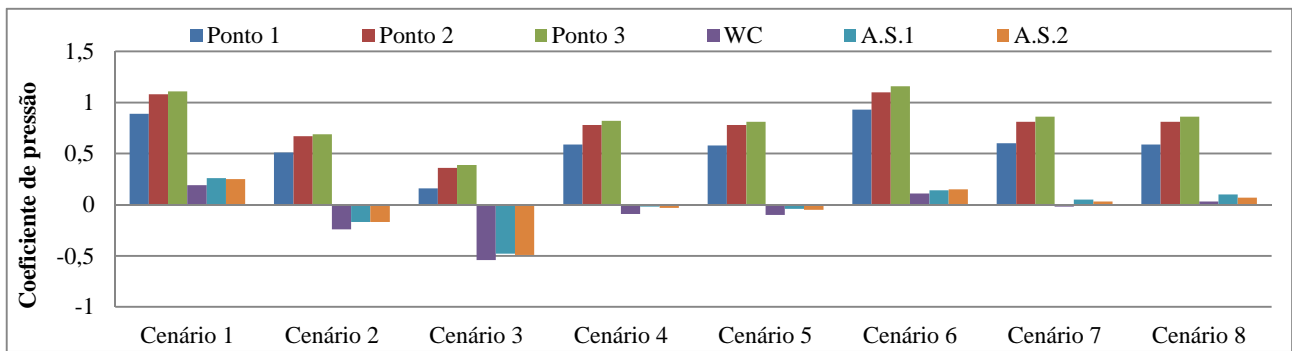


Figura 13 - Coeficientes de pressão para o primeiro pavimento com vento sudeste

No vigésimo terceiro pavimento os valores são ainda mais elevados, como era esperado em função da influência reduzida da rugosidade do meio. A pouca variação dos valores de  $C_p$  a barlavento (Pontos 1, 2 e 3) para os cenários de maior densidade urbana (cenários 4 a 8) correspondem, possivelmente, a uma vazão de ar expressiva (valores de  $C_p$  entre de 1,0 e 1,2), configurando condições favoráveis de ventilação natural interna sobretudo nas unidades mais altas, como é possível perceber na figura 14.

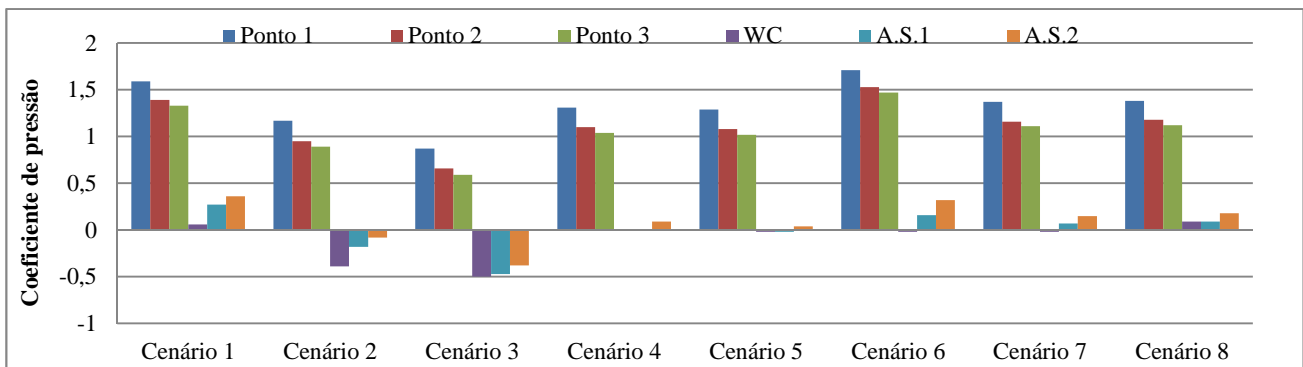


Figura 14 - Coeficientes de pressão para o vigésimo terceiro pavimento com vento sudeste

### 4.3. Coeficientes de pressão para o vento sul

O expressivo efeito de borda é responsável pelos valores negativos de  $C_p$  para o vento oriundo do sul, uma vez que os fluxos incidem perpendicularmente sobre a fachada lateral do edifício, desviando-se para as laterais. Assim, afastam-se das janelas situadas na fachada principal, gerando uma zona de sucção devido aos vórtices situados junto aos cantos do edifício.

Os valores de  $C_p$  negativos são verificados sobretudo no ponto 1 do primeiro pavimento. Contudo, as edificações do entorno parecem desviar os fluxos, fazendo-os incidir com mais pressão no pavimento mais baixo, pois não são verificados tantos valores negativos para os pontos 2 e 3 como no vigésimo terceiro pavimento. Reforçando tal efeito, percebe-se que no pavimento mais baixo os valores negativos no ponto 1 tendem a tornar-se positivos com o aumento na altura das edificações e elevação nos níveis de densidade, como verifica-se a partir do cenário 5, com valor de -0,14, até o cenário 8, onde o valor está em 0,25.

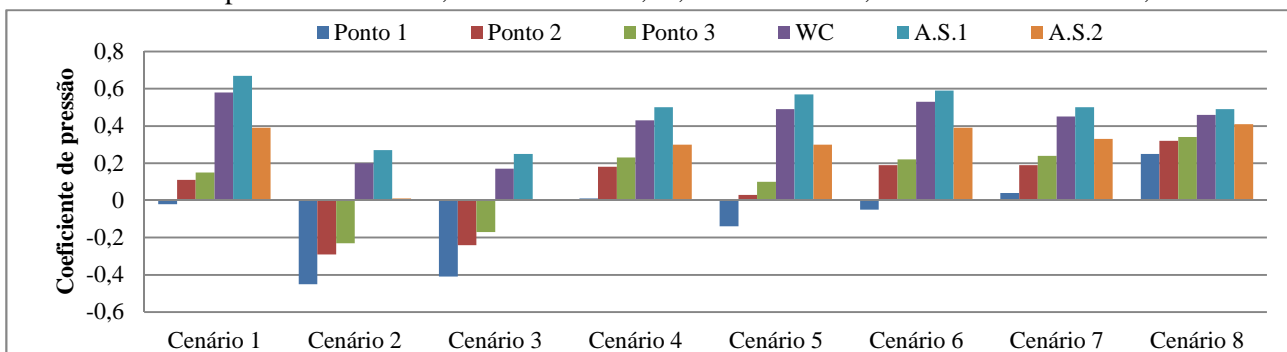


Figura 15 - Coeficientes de pressão para o primeiro pavimento com vento sul

As reentrâncias presentes na fachada posterior produzem efeitos significativos nos fluxos, alterando a pressão incidente. Especificamente, a posição da janela da área de serviço (A.S. 1) perpendicular ao vento produz valores mais altos de  $C_p$  em relação aos demais pontos, sobretudo no vigésimo terceiro pavimento.

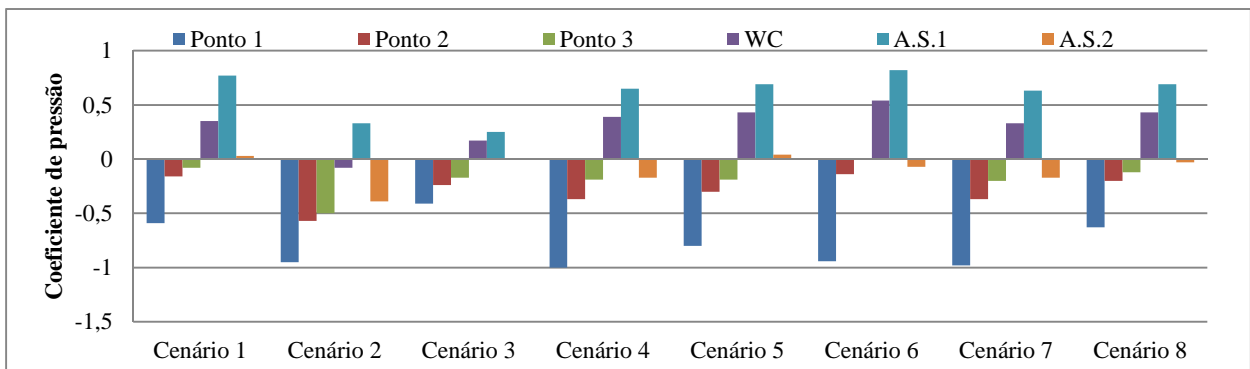


Figura 16 - Coeficientes de pressão para o vigésimo terceiro pavimento com vento sul

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados reforçam a necessidade de avaliar os Cps para cada configuração urbana específica, uma vez que obstáculos do entorno são significativos na alteração da pressão incidente. É possível perceber, também, a elevação no perfil vertical de velocidades com o aumento da altura das edificações.

Os valores necessitam de revisão, uma vez que valores muito elevados ou bastante reduzidos causam estranheza, cabendo uma validação dos resultados. Salienta-se, no entanto, que a verificação dos valores de Cp encontrados deve ser acompanhada da análise dos fluxos em planos verticais e horizontais.

Os dados de pressão obtidos até aqui serão aplicados como dados de entrada nas análises da ventilação natural interior de edificações, tanto do ponto de vista do desempenho térmico (vazão de ar) como o comportamento dos fluxos e campo de velocidades (técnica cfd). Torna-se fundamental, portanto, a melhoria e validação dos procedimentos como forma de organizar as futuras simulações e obter resultados precisos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIR INFILTRATION AND VENTILATION CENTER (AIVC). In: **WIND PRESSURE WORKSHOP AIC**, Brussels, 1984. Proceedings... Brussels: AIVC, 1984.
- BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Introdução à ventilação natural**. Maceió: EDUFAL, 2005.
- BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – RTQ - R**. Rio de Janeiro, 2010.
- BURNETT, J. BOJIC, M.; YIK, F. Wind-induced pressure at external surfaces of a high-rise residential building in Hong Kong. **Building and Environment** 40: 765–777, 2005.
- CARRILHO DA GRAÇA, G.; CHEN, Q.; GLICKSMAN, L.R.; NORFORD, L. K. Simulation of wind-driven ventilative cooling systems for an apartment building in Beijing and Shanghai. **Energy and Buildings** 34: 1 – 11, 2002.
- CHENG, C.K.; LAM, K.M.; DEMIRBILEK, F.N. Effects of building wall arrangements on wind-induced ventilation through the refuge floor of a tall building. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** 96: 656–664, 2008.
- CÓSTOLA, D., ALUCCI, M. P. Aplicação de CFD para o cálculo de coeficientes de pressão externos nas aberturas de um edifício. **Revista Ambiente Construído** 11, n. 1, p. 145-158, Porto Alegre, 2011.
- COSTOLA, D., BLOCKEN, B., HENSEN, J. Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs. **Building and Environment** 10: 2027-2036, 2009.
- HARGREAVES, D.M.; WRIGHT, N.G. On the use of the k-ε model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** 95: 355–369, 2007.
- HIRANO, T.; KATO, S.; MURAKAMI, S.; IKAGA, T.; SHIRAIISHI, Y. A study on a porous residential building model in hot and humid regions: Part 1—the natural ventilation performance and the cooling load reduction effect of the building model. **Building and Environment** 41: 21–32, 2006.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Sinopse do censo demográfico 2010**. IBGE: Rio de Janeiro, 2011.
- LAM, K. M, LEUNG, M.Y. H., ZHAO, J. G. Interference effects on wind loading of a row of closely spaced tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** 96: 562 – 583, 2008.
- MARUYAMA, T. Surface and inlet boundary conditions for the simulation of turbulent boundary layer over complex rough surfaces. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** n. 81, 311 – 322, 1999.
- NISHIZAWA, S.; SAVACHI, T.; NARITA, K.; SETO, H; ISHIKAWA, Y. A wind tunnel full scale building model comparison between experimental and CFD results based on the standard k-ε turbulence representation. **International Journal of Ventilation** 2: 419–429, 2003.
- FORTALEZA. Lei Complementar n. 062 de 02 de fevereiro de 2009. **Plano diretor participativo de Fortaleza – PDPFor**. 2009.
- \_\_\_\_\_. **Código de obras e posturas de Fortaleza**. Lei n. 5530 de 17 de dezembro de 1981.
- SHEN, X.; ZHANG, G.; BJERG, B. Comparison of different methods for estimating ventilation rates through wind driven ventilated buildings. **Energy and Buildings** 54: 297–306, 2012.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo suporte financeiro.