

SHEDS EXTRATORES E CAPTADORES DE AR: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA NA VENTILAÇÃO NATURAL

Marieli Azoia Lukiantchuki (1); Alessandra Prata Shimomura (2); Fernando Marques da Silva (3); Rosana Maria Caram (4)

- (1) Arquiteta, Mestre e Doutora em Arquitetura e Urbanismo – IAU/USP, mlukiantchuki@yahoo.com.br
(2) Professora doutora da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo – FAU/USP, arprata.shimo@gmail.com
(3) Engenheiro mecânico, Doutor, Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC, Lisboa, Portugal fms@lnec.pt
(2) Professora Associada do Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, Universidade de São Paulo – IAU/USP, rcaram@sc.usp.br

RESUMO

A ventilação natural é uma das estratégias mais eficientes para o condicionamento térmico passivo de edificações, ocorrendo por ação dos ventos, por efeito chaminé ou pela combinação de ambos. Dentre as estratégias de ventilação, destacam-se os *sheds*, aberturas no telhado, que funcionam como captadores ou extratores de ar, dependendo de sua localização em relação aos ventos dominantes. Apesar de terem um grande potencial, são pouco utilizados pela arquitetura nacional, devido à falta de dados técnicos acessíveis ao projetista, induzindo ao erro ou ao seu não uso. Além disso, muitas vezes esses dispositivos são utilizados para a extração ou para captação de ar de forma aleatória, sem uma análise detalhada sobre a influência da geometria desses elementos na ventilação natural. O objetivo dessa pesquisa é avaliar o desempenho de cinco diferentes configurações geométricas de *sheds* com relação à ventilação natural. O sistema foi avaliado para os ângulos de incidência dos ventos externos de 0° e 45° (extração), 90° (situação neutra) e 135° e 180° (captação). A metodologia adotada foi simulação através da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), utilizando como ferramenta o *software* CFX, desenvolvido pela empresa Ansys. Foram realizadas análises quantitativas (taxas de renovação de ar/hora e coeficiente de pressão) e análises qualitativas (imagens de vetores da trajetória do fluxo de ar interno). Os resultados indicam que alterações na geometria dos *sheds* causam mudanças significativas no comportamento do fluxo de ar interno. Além disso, notou-se que o uso de geometrias aerodinâmicas aumenta a velocidade dos ventos que tangenciam a cobertura e, conseqüentemente, geram uma queda de pressão mais significativa nas aberturas dos *sheds*, o que aumenta a velocidade do ar no ambiente interno.

Palavras-chave: *sheds*, simulação computacional, ventilação natural.

ABSTRACT

Natural ventilation is an efficient strategy for the cooling of buildings, occurring by stack effect, wind action or by combination of both. Among the ventilation strategies, *sheds* can be highlighted. These structures consist of roof openings that work as either air collectors or extractors, depending on their location in relation to the prevailing wind directions. Although they have a great potential, these devices are seldom used by national architecture due to the lack of available technical data to the designer. Furthermore, these devices are often used by extraction or collection without detailed analysis of the influence of the geometry of *sheds* in natural ventilation. This paper aims to evaluate the performance of five different geometries of the *sheds* in relation to natural ventilation. The system was evaluated under different external wind incidence angles: 0° e 45° (air extraction), 90° (neutral situation) e 135° e 180° (air caption). The methodology used was Dynamic Fluid Computational simulation, using as a tool the CFX software, developed by Ansys company. Quantitative (air change rate and pressure coefficient) and qualitative (internal airflow path) analyses were performed. The results indicate that changes in *shed* geometry cause significant changes in behavior of the air flow. Furthermore, it was noted that the use of an aerodynamic geometry increases the speed of the winds flowing along the coverage and consequently a more significant pressure drop in the openings of the *sheds* occurred. Thus, the indoor air velocity was increased.

Keywords: *sheds*, computer simulation, natural ventilation.

1. INTRODUÇÃO

A ventilação natural consiste no deslocamento de ar através do edifício, originada por diferenças de pressão entre as áreas externas e internas. Essa estratégia pode ocorrer pela ação dos ventos ou pela diferença de temperatura do ar interna e externa (efeito chaminé). Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014) o Brasil, devido ao seu imenso território e por se localizar entre dois trópicos, possui um clima bastante variado, sendo que grande parte do território brasileiro é classificada como tendo um clima quente e úmido (CÂNDIDO *et al.* 2010). Nestas regiões a ventilação natural é uma eficiente estratégia para a obtenção de conforto térmico, reduzindo o consumo de energia elétrica.

O uso dessa estratégia é prejudicado em regiões onde não há vento externo relevante. Isso ocorre em regiões com ventos de fraca intensidade ou pela falta de espaços adequados para a circulação de ar na malha urbana, devido aos obstáculos externos que os bloqueiam. Isso pode ser melhorado através da ventilação pelo efeito chaminé ou por meio de captadores de ar na cobertura, cujas obstruções à circulação do ar são menores, possibilitando correntes de ar com maior velocidade.

Uma das soluções de ventilação ao nível da cobertura são os *sheds* que funcionam como captadores ou extratores de ar, dependendo de sua posição em relação aos ventos. No entanto, apesar de terem um grande potencial, são pouco explorados pela arquitetura nacional, devido ao pouco conhecimento sobre o seu funcionamento e à falta de dados técnicos disponíveis aos projetistas (LÔBO e BITTENCOURT, 2003).

Os exemplos mais comuns desses dispositivos são os “dentes de serra”, cujo formato é ortogonal e sem muitas variações (figura 1). No Brasil, destaca-se o trabalho do arquiteto João Filgueiras Lima, Lelé, cujos *sheds* estão presentes na maioria dos seus projetos. Baseado nas suas experiências e nos fatores climáticos locais, em determinados momentos ele prioriza a extração do ar e em outros a entrada dos ventos. Além disso, ao longo dos anos Lelé foi desenvolvendo *sheds* com geometrias aerodinâmicas (figura 2), buscando melhorar a ventilação e a iluminação naturais. O formato desses dispositivos é importante, pois segundo Hoof *et al.* (2011) um dos parâmetros que influem na ventilação natural é a geometria do edifício.



Figura 1 – Modelo de *sheds* ortogonais – dente de serra.

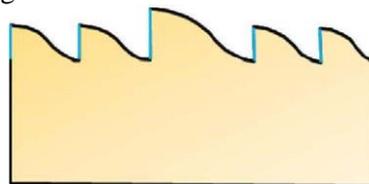


Figura 2 – Modelo de *sheds* aerodinâmicos.- Sarah Salvador, Lelé

Através do levantamento bibliográfico realizado (HOLMES, 1983, 1984 e 1987; STATHOPOULOS e MOHAMMADIAN, 1985; GANDEMER *et al.*, 1989; STATHOPOULOS e SAATHOFF, 1992; HERAS *et al.*, 2005; PERÉN *et al.*, 2007; LUKIANTCHUKI, 2010; PREVATT *et al.*, 2010; EUROCODE, 2010; ARAUJO, 2011; LIMA *et al.*, 2001; BHATNAGAR *et al.*, 2012; TORRES, ADELINO e BITTENCOURT, 2013), notou-se que a maioria das publicações referem-se ao *shed* com formato ortogonal. Grande parte desses trabalhos está relacionada ao uso de *sheds* para incorporar a luz natural nos ambientes e poucos investigam o seu potencial para extração e captação do ar. Além disso, a maioria das pesquisas relacionadas com a análise dos ventos nesses dispositivos, e que envolvem Coeficientes de Pressão (C_p), está relacionada com a análise estrutural das cargas dos ventos e não ao potencial da ventilação natural. Outra questão é que, segundo Yang (2004), os valores de C_p disponíveis na literatura são para um número limitado de configurações geométricas de edifícios. Em geral, somente formas muito simples estão disponíveis. Edifícios com geometrias complexas, como os *sheds*, não são considerados. Cóstola e Alucci (2007) ressaltam que geralmente os dados se referem a valores médios de C_p nas fachadas, o que oculta importantes informações.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é avaliar o impacto de diferentes configurações geométricas no desempenho de *sheds* extratores e captadores de ar, com relação à ventilação natural por ação dos ventos.

3. MÉTODO

Para atingir os objetivos desse trabalho, utilizou-se uma metodologia dividida em duas etapas: 1. Definição dos modelos avaliados e 2. Simulação através de Dinâmica dos Fluidos Computacional.

3.1. Definição dos modelos avaliados

3.1.1. Definição dos dados climáticos

Analisaram-se os dados dos ventos das principais cidades brasileiras da zona bioclimática 8 (NBR15220), por ser a região que exige uma ventilação permanente ao longo de todo o ano. Diante disso, os modelos foram avaliados para uma velocidade máxima dos ventos externos de 7,0m/s. Esse valor é referente aos dados

medidos nas estações meteorológicas. Sendo assim, foi utilizada a equação 1 a seguir, para a correção da velocidade do vento na altura da edificação, considerando as obstruções das edificações ao redor. Adotou-se como entorno um ambiente suburbano com valor de $\alpha = 0,21$, obtido através de ensaios no túnel de vento¹.

$$\frac{U}{U_{ref}} = \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^\alpha \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

| | |
|------------------|--|
| U | Velocidade média do vento em certa altura h (m/s) |
| U _{ref} | Velocidade do vento medida na altura de referência (m/s) |
| h | Altura da edificação que se deseja avaliar a velocidade do vento (m) |
| h _{ref} | Altura de referência da velocidade do vento medida (10m) |
| α | Expoente de lei potencial da camada limite atmosférica (depende do entorno). |

O desempenho dos *sheds* foi avaliado por ação dos ventos sob a influência de diferentes ângulos de incidência dos ventos externos: extratores de ar (0° e 45°), situação neutra (90°) e captadores de ar (135° e 180°) (figura 3). A análise do efeito chaminé também é de grande importância devido ao aquecimento dos telhados sob o efeito do sol e dos espaços internos pela presença dos usuários e equipamentos. No entanto, essa análise não foi o foco desse artigo e será apresentada posteriormente.

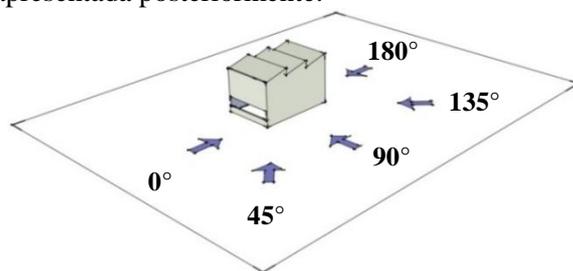


Figura 3 - Ângulos de incidência dos ventos externos analisadas

3.1.2. Definição dos modelos avaliados

Como o objetivo do artigo é avaliar o potencial da ventilação natural através de diferentes geometrias de sheds, apenas modelos com esse dispositivo foram estudados. Cinco diferentes geometrias foram avaliadas: 1) *sheds* ortogonais (caso de referência - CR) e 2) quatro *sheds* projetados por Lelé, por ser o arquiteto brasileiro que mais utiliza esses dispositivos para captação e para extração de ar e com a maior variação geométrica: G01, G02, G03 e G04. O modelo analisado apresenta um formato retangular com 5,00m de largura e altura e 7,50m de comprimento. O edifício tem 3 sheds, cuja distância entre eles é de 2,50m. Todas as aberturas têm a mesma dimensão 5 x 0,625m e a distância vertical entre elas é de 3,75m (figura 4).

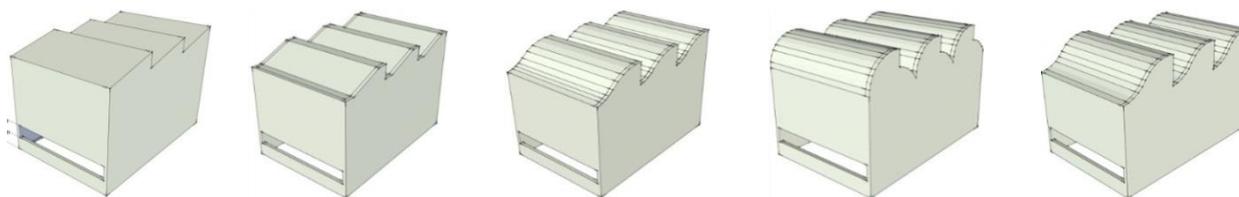


Figura 4 – Modelos avaliados: CR, G01, G02, G03 e G04, respectivamente

3.2. Simulação computacional

Para a realização das simulações computacionais, utilizou-se o *software* CFX 12.0, devido aos seguintes critérios: 1) *software* baseado na Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), sendo adequado a estudos da ventilação natural; 2) ferramenta amplamente utilizada nas pesquisas de análise de fluidos nas áreas de arquitetura, apresentando boa coerência dos resultados com os fenômenos físicos e 3) licença computacional no Departamento de Engenharia Aeronáutica da Escola de Engenharia de São Carlos, da USP (EESC/USP).

3.2.1. Construção do modelo

A preparação do modelo tridimensional foi realizada no *software* AutoCAD, de modo que os objetos sejam compreendidos como sólidos no Icem CFX. Todas as janelas foram consideradas abertas. Junto ao edifício, elaborou-se um volume externo sem aberturas, representando o domínio pelo qual o fluido escoará (figura 5).

¹ Testes da Camada Limite Atmosférica realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa (LUKIANTCHUKI, 2015)

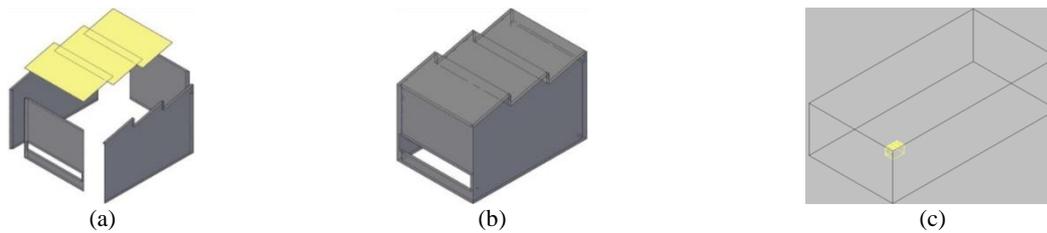


Figura 5 – (a) Construção da geometria no AutoCAD, (b) edifício pronto e (c) edifício e o domínio como um bloco unificado.

Optou-se pelo domínio retangular, cujas dimensões seguiram as recomendações de Harries (2005): distâncias a barlavento e nas laterais = $5H$ (25m); altura = $6H$ (30m); distância a sotavento = $15H$ (75m), sendo $H=5m$, que corresponde à altura do modelo simulado (figura 6). A área de obstrução do edifício no domínio foi de 1,1%, na seção transversal no sentido do fluxo e 1,5% no sentido perpendicular ao fluxo, atendendo a sugestão de Cost (2004), cujo valor não deve exceder 3%.

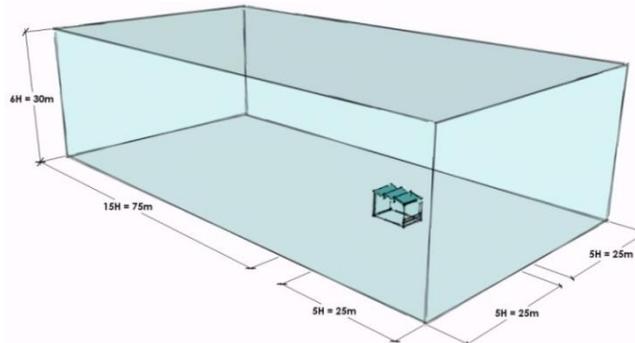


Figura 6 – Dimensões adotadas para o domínio retangular

3.2.2. Geração da malha computacional

Para todas as simulações utilizou-se uma malha estruturada tetraédrica cujos parâmetros globais adotados foram: *maximum element size* de 16; *natural size* de 4; *cells in gap* de 8. Após a definição desses parâmetros, a malha foi refinada nas superfícies do edifício em um valor de 0,20m, a fim de melhorar a visualização do fluxo de ar no espaço interno e no entorno imediato ao edifício². A malha foi gerada, determinando a quantidade de elementos da malha e o tempo de processamento das simulações (figuras 7 e 8).

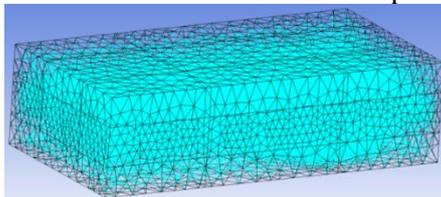


Figura 7 – Vista geral da malha para o Caso de referência

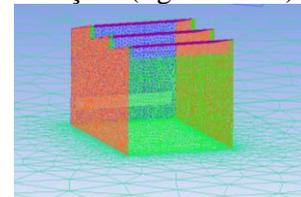


Figura 8 – Detalhe da malha gerada para o Caso de referência

3.2.3. Definição das condições iniciais e de contorno

As condições do domínio foram semelhantes às de um túnel de vento: entrada como INLET e a saída como OUTLET; as laterais e o teto como *WALL free slip* (sem atrito) e; o piso e as superfícies do edifício como *WALL no slip* (com atrito). A simulação decorreu em regime permanente, na condição isotérmica a $25^{\circ}C$, com o modelo K-epsilon de turbulência (*first order* – intensidade de turbulência média: 5%) e parâmetros de resolução para controle de convergência de 600 iterações e nível de convergência MÁX de 10^{-4} .

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

De modo geral, a distribuição e a velocidade do fluxo de ar interno são influenciadas pela implantação do edifício no terreno e pela orientação de suas aberturas aos ventos dominantes, uma vez que a maneira como o vento incide na edificação modifica os campos de pressões no entorno e ao redor das janelas e, portanto, a forma como o fluxo interno percorre o espaço. Aliado a esses fatores, modificações na geometria do edifício também exercem uma influência significativa no desempenho da ventilação no espaço interno. A figura 9 apresenta as taxas de renovação de ar/hora em função dos ângulos de incidência dos ventos externos e a figura 10 a variação (%) nesses valores, em cada geometria, em relação ao CR. A figura 11 apresenta os Cps médios nas aberturas de entrada e saída do ar em função dos ângulos de incidência dos ventos.

² Valores definidos após a realização de testes de sensibilidade da qualidade da malha computacional (LUKIANCHUKI, 2015)

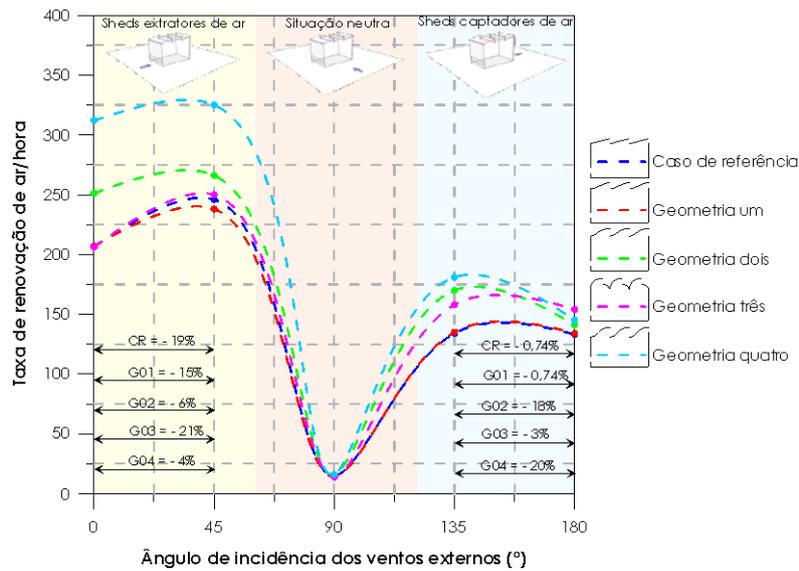


Figura 9 – Taxas de renovação de ar/hora em função dos ângulos de incidência dos ventos externos.

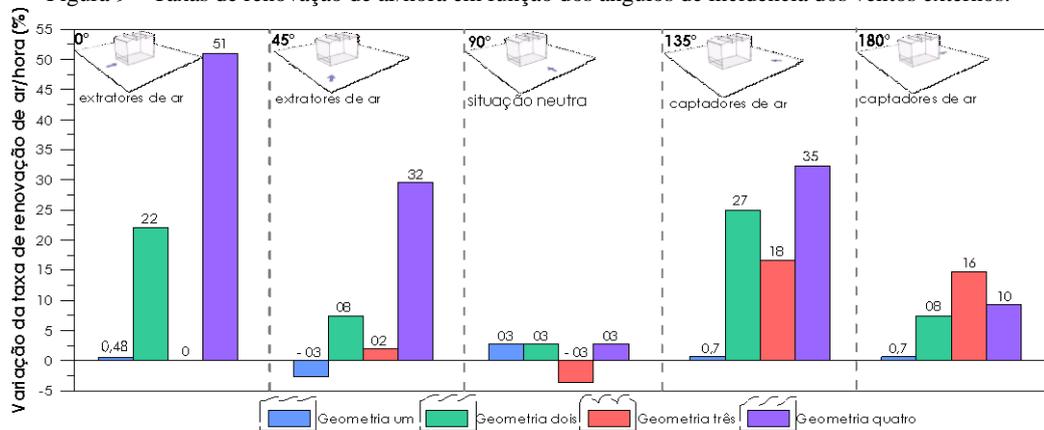


Figura 10 – Variação da taxa de renovação de ar/hora (%) para cada geometria analisada, em relação ao CR.

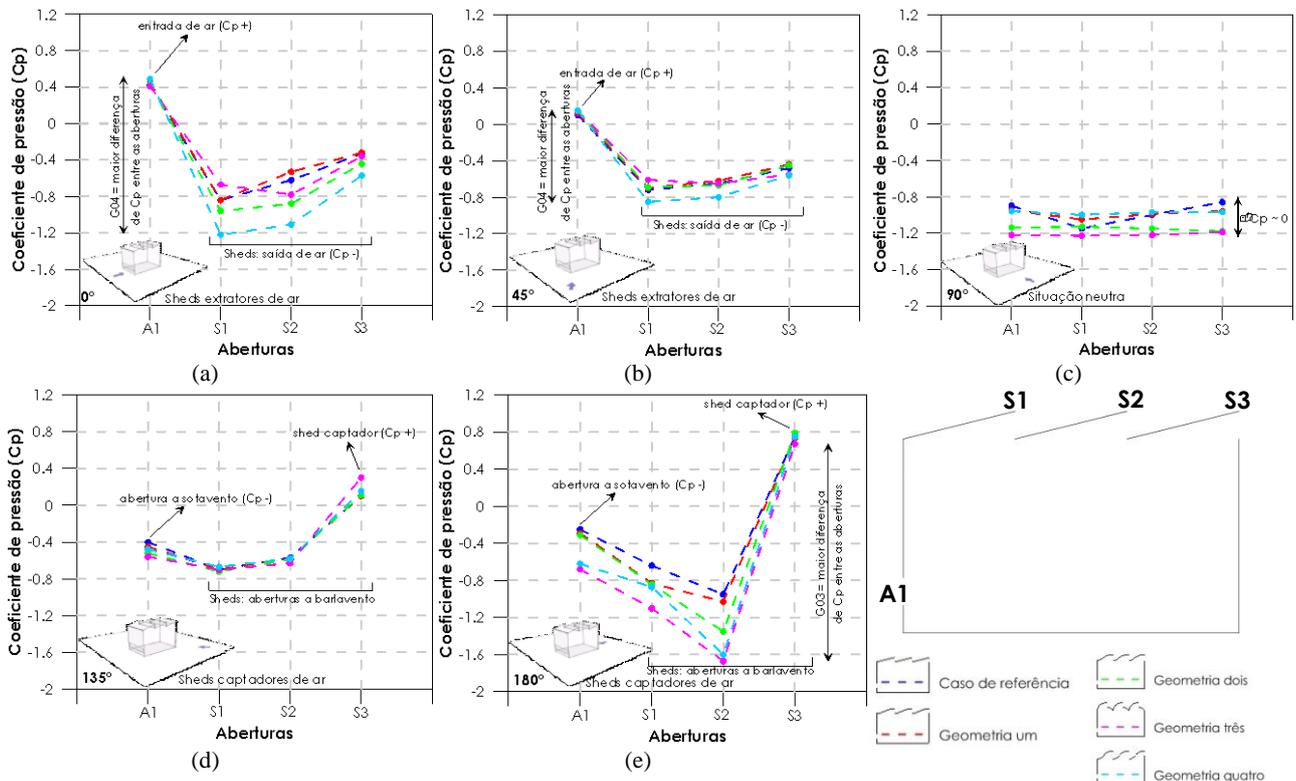


Figura 11 - Cps nas aberturas de entrada e saída de ar, para cada geometria (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 135° e (e) 180°

De modo geral, o ângulo de incidência dos ventos e a mudança na geometria dos *sheds* influenciam na ventilação natural, apresentando alterações expressivas nos valores de Cps nas aberturas e nas taxas de renovação de ar. Tanto para os *sheds* funcionando como extratores quanto para os captadores de ar, as maiores taxas foram alcançadas quando os ventos incidiram obliquamente no edifício, constatando-se diferenças significativas em relação às incidências perpendiculares. Para todas as geometrias analisadas os *sheds* como extratores de ar apresentaram um desempenho superior do que como captadores (figuras 9 e 10).

Isso foi confirmado pelo aproveitamento da velocidade do ar no ambiente interno, em função dos ventos externos (tabela 1), onde os *sheds* extratores possibilitaram maior aproveitamento dos ventos externos que os captadores. No entanto, a velocidade interna média do ar é maior para os ângulos perpendiculares às aberturas, devido à sua distribuição mais homogênea no espaço interno, ao contrário dos ângulos oblíquos, que geram uma região com velocidades reduzidas, conforme veremos a seguir. Para a situação neutra tem-se um desempenho significativamente reduzido, em comparação com os outros ângulos analisados.

Tabela 1– Razão entre a velocidade media do ar interno e a velocidade dos ventos externos ($U_{\text{interno}}/U_{\text{externo}}$).

| Casos | Extração de ar | | Situação neutra | Captação de ar | |
|-------|----------------|------|-----------------|----------------|------|
| | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° |
| CR | 0,33 | 0,22 | 0,07 | 0,1 | 0,1 |
| G01 | 0,31 | 0,22 | 0,05 | 0,12 | 0,13 |
| G02 | 0,35 | 0,24 | 0,05 | 0,18 | 0,22 |
| G03 | 0,24 | 0,23 | 0,04 | 0,20 | 0,24 |
| G04 | 0,37 | 0,26 | 0,04 | 0,19 | 0,21 |

4.1. Sheds extratores de ar

Para a situação dos *sheds* como extratores de ar, notou-se que a G04, seguida da G02 apresentaram as maiores taxas de renovação de ar por hora, registrando um incremento de 51% e 22%, em relação ao CR para o ângulo de 0° e 32% e 8% para 45°, respectivamente. Já os casos G01 e G03 apresentaram desempenho similar ao CR, sendo que as variações nessas taxas foram insignificantes para os dois ângulos analisados (0,48% e 0%, para 0° e -3% e 2% para 45°, respectivamente), conforme apresentado nas figuras 9 e 10.

As figuras 12 e 13 apresentam a velocidade e a distribuição do fluxo de ar em um plano 0,94m acima do piso para os ângulos de 0° e 45°, respectivamente. Com relação à distribuição do fluxo de ar interno para 0°, a mudança nas geometrias dos *sheds* não exerceu uma influência significativa, com exceção da G03 que ocasionou uma redução nos valores de velocidade na região próxima à abertura a barlavento. Tem-se uma uniformidade no fluxo de ar no espaço interno devido à incidência perpendicular do vento na abertura e a simetria das pressões nessa região. O ar atravessa a abertura a barlavento com altas velocidades, sofrendo uma redução logo após entrar no espaço, devido à expansão da corrente de ar. Em seguida, as velocidades vão aumentando até atingir o pico no centro do ambiente, devido à conjugação com a circulação descendente interna e, posteriormente, decrescem. Destacam-se G04 e G02 que apresentaram a região central do espaço interno com as maiores velocidades do ar (figura 12).

Já quando os ventos incidem obliquamente na edificação, a distribuição do fluxo de ar interno não foi uniforme, sendo este desviado para a lateral do espaço. Assim, a velocidade na área central é menor, sendo registrados valores entre 0m/s e 0,6m/s. Embora a velocidade na abertura e próxima a ela tenha sido bastante elevada (em torno de 4,0m/s), o fluxo de ar foi sofrendo uma redução à medida que se afastava da face a barlavento. Novamente, a G04 registrou os maiores valores de velocidade do ar (figura 13).

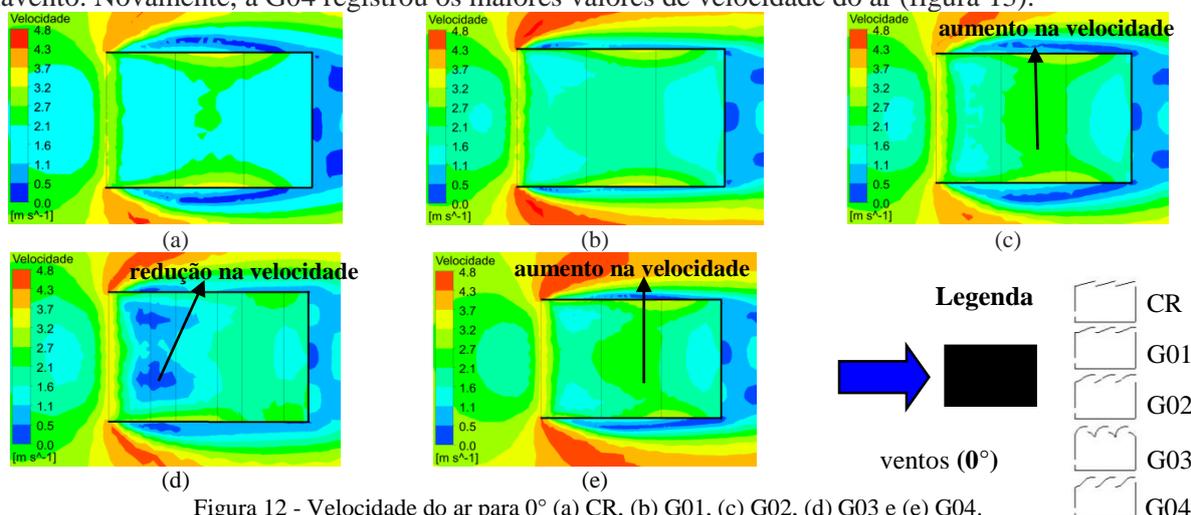


Figura 12 - Velocidade do ar para 0° (a) CR, (b) G01, (c) G02, (d) G03 e (e) G04.

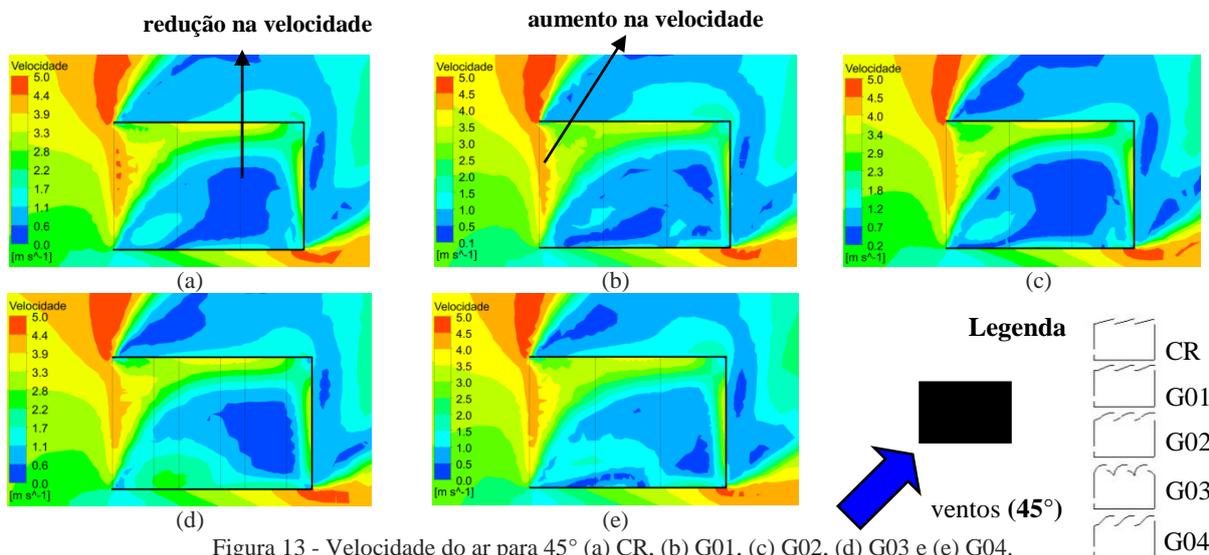


Figura 13 - Velocidade do ar para 45° (a) CR, (b) G01, (c) G02, (d) G03 e (e) G04.

Em todos os casos, o fluxo de ar atravessa a abertura a barlavento (A1) como um jato descendente com velocidades elevadas, o que possibilita uma maior corrente de ar na zona de ocupação dos usuários e influencia na circulação interior do fluxo de ar, onde se verifica a formação de um único vórtice central em CR e G01, ao contrário da G03 que, devido o formato dos *sheds* em duplo arco, impõe uma ondulação em torno de dois eixos (figura 14). Essa distribuição da quantidade de movimento do fluxo de ar interno vai, também, condicionar o funcionamento dos *sheds*.

Do lado externo é a distribuição de pressão nas aberturas, expressa pelos C_p , que determina os fluxos de entrada ou saída, bem como a sua intensidade. Pelo fato de o escoamento exterior ter de contornar arestas bem marcadas, geram-se zonas de separação onde as velocidades são menores e $C_p < 0$. É da ação conjunta do vento e da circulação interior que resulta o fluxo em cada abertura. Desse efeito resultam campos de pressão assimétricos nas aberturas com diferentes valores de C_p (menos negativos e em alguns casos positivos), minimizando a intensidade da sucção na porção inferior da janela, o que, em conjunto com a influência do *shed* seguinte, dá origem a uma zona de recirculação nos *sheds*, com entrada e saída de ar pela mesma abertura. No entanto, essa recirculação permanece nessa região, não penetrando no interior (figura 14).

A forma arquitetônica interfere diretamente na distribuição das pressões nas superfícies dos edifícios e a maneira como o escoamento contorna as geometrias aerodinâmicas reduz a separação, o que aumenta localmente as velocidades, conduzindo a valores de C_p mais baixos e um maior ΔC_p s entre as aberturas (figura 11). Para os *sheds* funcionando como extratores (0° e 45°), os desempenhos do CR e da G01 foram muito próximos, devido à similaridade entre as suas geometrias. Isso possibilita uma semelhança na trajetória dos ventos e na distribuição das pressões na superfície desses dispositivos, o que implica em valores similares de C_p s. Nota-se uma proximidade da G03 com o CR e a G01, apesar do formato diferenciado, ocasionando taxas de renovação similares. Em todos os casos, o ar que tangencia os *sheds* gera uma sombra de vento nas aberturas posteriores e, conseqüentemente, valores negativos de C_p e a extração do ar. Nota-se que a diferença de pressão entre as aberturas de entrada e saída de ar foi maior na G04, possibilitando uma maior movimentação do ar no interior do edifício e, portanto, é a situação mais vantajosa para a ventilação por *sheds* extratores, por ação dos ventos. Em seguida, temos a G02, que apresenta semelhança com a G04. No entanto, a curvatura da G04 forma uma região de alta pressão mais acentuada, e uma zona de sombra mais pronunciada (figuras 11 e 14).



Figura 14 - Vetores de velocidade do ar para o CR e G03 - ângulo de 0°.

4.2. Situação neutra

Quando os ventos incidiram paralelamente às aberturas (90°), foi registrado o pior desempenho em todos os casos analisados. O vento que as tangenciam ocasiona zonas de subpressão e sobrepressão e, conseqüentemente, entrada e saída de ar pela mesma janela. A movimentação do ar é induzida pela assimetria das pressões nessas regiões, inclusive pelo fato da abertura mais baixa existir apenas em uma lateral do edifício,

associada à turbulência pela interação do vento incidente com os *sheds*. Devido às taxas de renovação do ar reduzidas e a movimentação do ar interno praticamente nula, nota-se que as recirculações que ocorrem nas aberturas não penetram no edifício (figura 15). Isso é ocasionado pelos valores similares de C_p s nas aberturas, o que gera ΔC_p s próximos de zero. Além disso, notam-se valores bastante similares entre as diferentes geometrias, indicando que para essa situação, a variação no formato dos *sheds* não se apresenta como um fator decisivo no desempenho da ventilação do ambiente interno (figuras 9, 10 e 11).

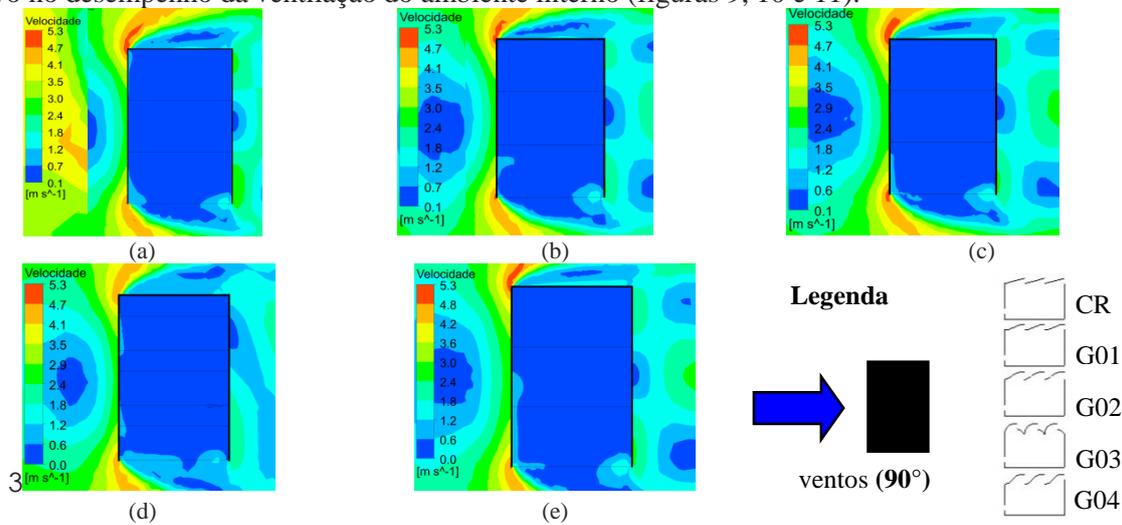


Figura 15 - Velocidade do ar para 90° (a) CR, (b) G01, (c) G02, (d) G03 e (e) G04.

4.3. Sheds captadores de ar

No caso dos *sheds* como captadores de ar, todas as geometrias apresentaram um desempenho superior ao CR, mas na G01 essa diferença foi insignificante. Quando o vento incidiu perpendicular, e frontalmente, às aberturas as maiores taxas de renovação foram registradas na G03, apresentando um incremento de 16% em relação ao CR. G04 e G02 apresentaram desempenhos próximos ao da G03, registrando, inclusive, um desempenho superior para 135° (incremento de 16%, 10% e 8% para 0° e 18%, 35% e 27% para 45°, para G03, G04 e G02, respectivamente). Isso reforça a constatação de que essa geometria também apresentou um desempenho satisfatório para a captação do ar pela cobertura (figuras 9 e 10). Como já constatado anteriormente, quando o vento incidiu a 180°, a distribuição do fluxo de ar interno foi simétrica, ao contrário de 135°. Para ambas as situações, o CR e a G01 apresentaram desempenhos similares (figuras 16 e 17).

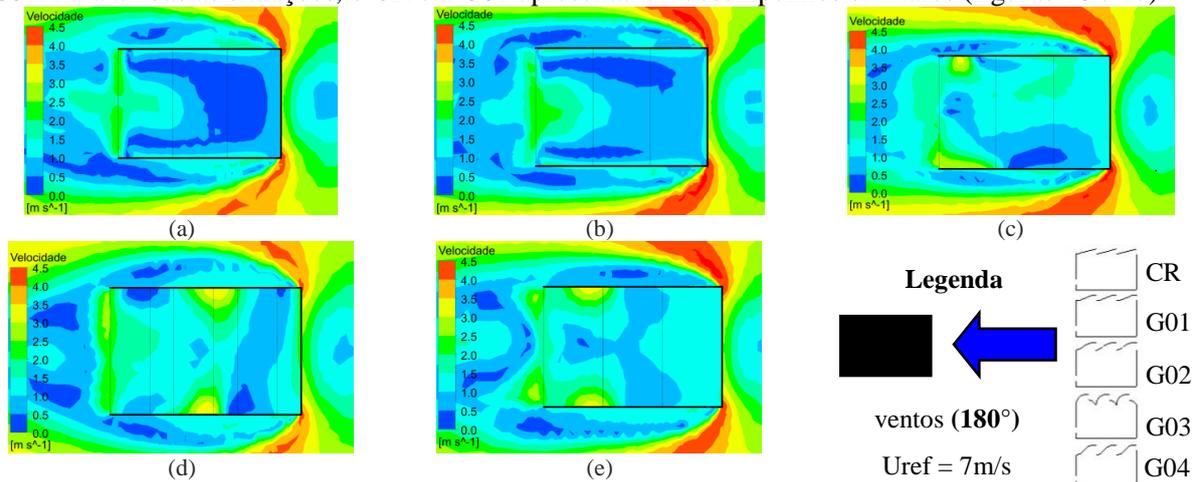


Figura 16 - Velocidade de ar para 180° (a) CR, (b) G01, (c) G02, (d) G03 e (e) G04

Em todas as geometrias, para 180°, apenas o dispositivo frontal a barlavento funciona como captador ($C_p(S3) > 0$). O fluxo de ar incidente na cobertura gera uma zona de separação com a formação de uma sombra de vento que ocasiona a queda dos valores de pressão nas aberturas dos *sheds* localizados na região posterior ($C_p(S1), (S2) < 0$), gerando valores de ΔC_p mais elevados entre as aberturas. Esse efeito aumenta a probabilidade de ocorrência de um fluxo reverso nas aberturas S1 e S2, que ao contrário de captarem o ar, passam a extraí-lo. Para 135°, nos *sheds* posteriores, tem-se a entrada de ar na parte das aberturas mais próximas da região a barlavento, enquanto na outra se tem a saída de ar. Isso ocorre, devido à assimetria das pressões pela incidência oblíqua dos ventos no edifício.

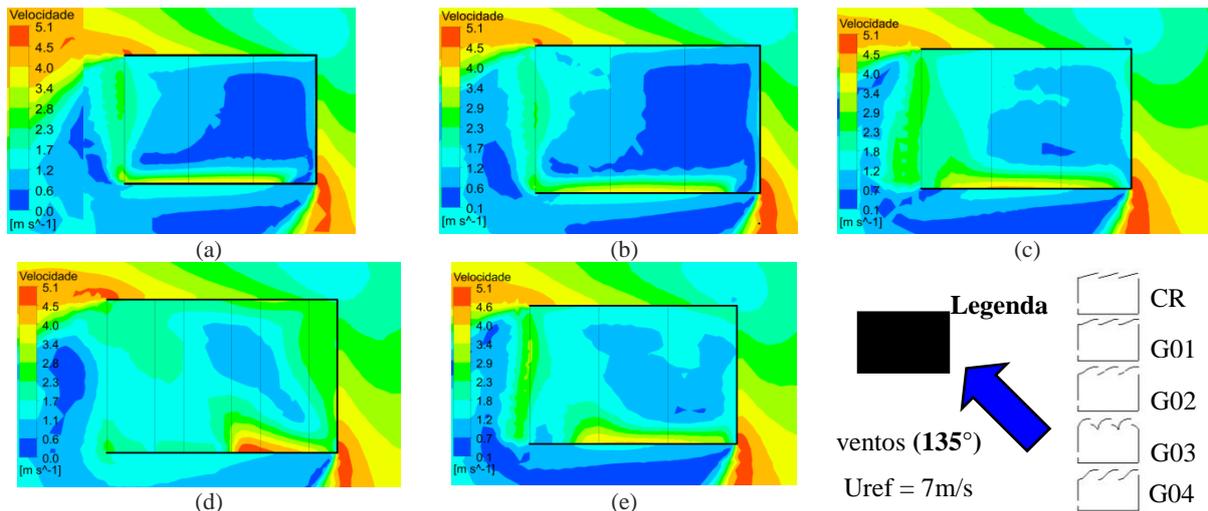


Figura 17 - Velocidade para 135° (a) CR, (b) G01, (c) G02, (d) G03 e (e) G04

Os valores de C_p foram semelhantes para o CR e a G01 (exceto em S2) e o melhor desempenho ocorreu na G03, que possui o maior ΔC_p entre as aberturas e as maiores taxas de renovação, tendo uma diferença significativa em relação ao CR (18% e 16% para 135° e 180°, respectivamente). No entanto, a diferença em relação a G04 e a G02 foi menos significativa, reforçando que também são boas opções para a captação. No CR e na G01 o fluxo de ar é captado pelo primeiro *shed*, verificando-se a formação de um único vórtice central, semelhante ao que ocorre em 0°, sendo parcialmente extraído pelos *sheds* posteriores. Em função disso, não ocorre uma circulação efetiva do espaço interior pelo fluxo de ventilação (figura 18).

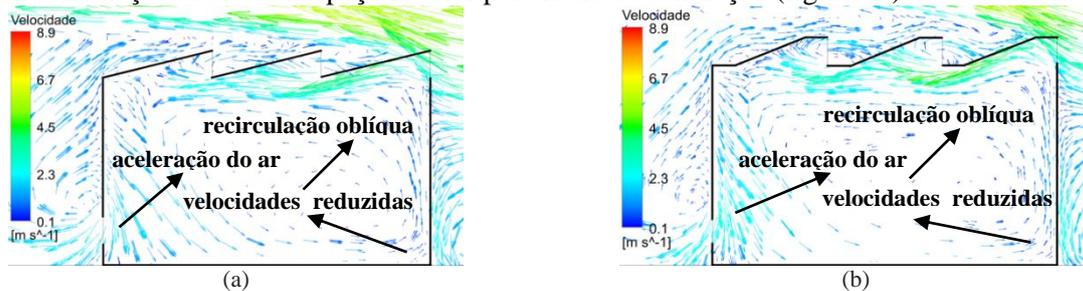


Figura 18 - Vetores de velocidade do ar (a) CR e (b) G01 - ângulo de 180°

Nas outras geometrias, devido à curvatura aerodinâmica acentuada, o fluxo é desviado para baixo de forma mais intensa, o que aumenta a velocidade na zona de ocupação dos usuários, como em G04 e G03. Isso faz com que um fluxo com maiores velocidades atinja locais mais distantes do *shed* captador. Por outro lado tem-se a formação de uma sombra de vento com velocidades reduzidas no centro do ambiente, de modo que o fluxo que entra com altas velocidades pela cobertura gera uma zona de calmaria com valores reduzidos na região próxima ao *shed* captador (figura 19).

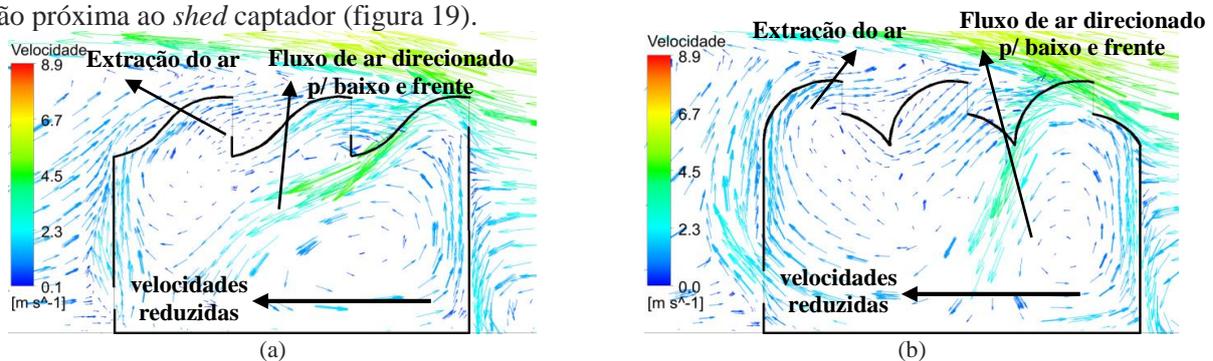


Figura 19 - Vetores de velocidade do ar (a) G04 e (b) G02 - ângulo de 180°

5. CONCLUSÕES

De modo geral os *sheds* como extratores apresentaram um melhor desempenho do que como captadores de ar. Com relação à distribuição do fluxo de ar no ambiente interno, notou-se que os extratores possibilitam uma melhor distribuição e com maiores valores de velocidade do ar. Isso aconteceu, pois, apesar dos *sheds* como captadores apresentarem um maior número de aberturas de entrada de ar, apenas o 1° *shed* funciona como captador. O vento incidente na cobertura forma uma sombra de vento que gera valores de C_p s negativos nos

sheds posteriores e, conseqüentemente, a extração do ar. Para os *sheds* como extratores a G04 apresentou o melhor desempenho seguida da G02 (incremento de 51% e 22%, respectivamente para 0° e 32% e 8% para 45°). Já as G01 e G03 apresentaram desempenhos similares ao CR (0,48% e 0%, para 0° e -3% e 2% para 45°, respectivamente). Para os *sheds* como captadores, G03, G04 e G02 se apresentaram como boas opções, registrando desempenhos semelhantes (incremento de 16%, 10% e 8% para 0° e 18%, 35% e 27% para 45°, respectivamente). Novamente, CR e G01 tiveram desempenhos similares. Para 90°, foi registrado o pior desempenho em todos os casos analisados, apresentando, valores similares entre as diferentes geometrias, indicando que para essa situação, a variação no formato dos *sheds* não se apresenta como um fator decisivo no desempenho da ventilação do ambiente interno.

Diante disso, nota-se que tanto G04 quanto G02 apresentaram maior viabilidade de uso em situações que exigem uma adaptação às mudanças dos ângulos de incidência dos ventos externos. O fato de apresentar um desempenho adequado para extração e para a captação do ar é interessante quando mudanças no entorno, como surgimento de novos prédios ou de vegetações influenciam na direção dos ventos. As geometrias aerodinâmicas não apresentam obstáculos à circulação do ar, aumentando assim a velocidade dos ventos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, C. V. de A. **Análise de componentes arquitetônicos para potencialização da ventilação natural com ênfase em captadores de vento**. 2011. 130 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2011.
- BHATNAGAR, N. K.; GUPTA, P. K.; AHUJA, A. K. Wind pressure distribution on low-rise building with saw-tooth roof. VI National Conference on Wind Engineering, **Anais...**, 2012.
- CÂNDIDO, C.; DEAR, R. J. de; LAMBERTS, R.; BITTENCOURT, L. Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone. **Building and environment**, v. 45, p. 222-229. 2010.
- EUROCODE Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: **General actions – wind actions**. The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC, 2010.
- HERAS, M. R.; JIMÉNEZ, M. J.; SAN ISIDRO, M. J.; ZARZALEJO, L. F.; PÉREZ, M. Energetic analysis of a passive solar design, incorporated in a courtyard after refurbishment, using an innovative cover component based in a sawtooth roof concept. **Solar energy**. N. 78, p. 85-96, 2005.
- HIEN, W. N. *et al.* The use of performance-based simulation tools for building design and evaluation – a Singapore perspective. **Building and environment**, v. 35, p. 709-736. 2000.
- HOLMES, J. D. Wind loading of saw-tooth roof buildings – I. Point pressures. **Internal Rep. No. 83/17**. CSIRO. Div. of Building Research. Highett, Australia, 1983.
- HOLMES, J. D. Wind loading of saw-tooth roof buildings – II. Panel pressures. **Internal Rep. No. 84/1**. CSIRO. Div. of Building Research. Highett, Australia, 1984.
- HOLMES, J. D. Wind loading of multi-span buildings. **First national structural Engineering Conf., Institution of Engineers**. Australia, Melbourne, Australia, 1987.
- HOOFF, T. V.; BLOCKEN, A.; AANEN, B. B. A Venturi-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings: wind tunnel and CFD evaluation of different design configurations. **Building and Environment**, v. 46, 1797-1807, 2011.
- GANDEMER, J.; BARNAUD, G. **Ventilation naturelle des habitations sous climat tropical humide: Approach aerodynamique**. Report for the CSTB. Nantes, 1989.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 2ª edição. São Paulo: ProLivros, 2004.
- LIMA, A. B.; PEREIRA, F. R.; VERSAGE, R.; LAMBERTS, R. A influência de diferentes aberturas zenitais na distribuição da luz natural e na redução do consumo de energia elétrica. XI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e VII Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...** Búzios: ENCAC. CR-ROM, 2011.
- LÔBO, D. G. F.; BITTENCOURT, L. S. A influência dos captadores de vento na ventilação natural de habitações populares localizadas em climas quentes e úmidos. **Ambiente construído**, Porto Alegre, V.3, n.2, p.57-67, abr./jun. 2003.
- LUKJANTCHUKI, M. A. **Sheds extratores e captadores de ar para indução da ventilação natural em edificações**. 2015. Tese (doutorado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- PERÉN, J. I. M.; GRECO, P.; CARAM, R. M. Análise computacional dos *sheds* da Rede de Hospitais Sarah Kubitschek utilizando o software ANSYS CFX. IX Encontro Nacional e V Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...** Ouro Preto: ENCAC. CD-ROM, 2007.
- PREVATT, D. O.; ASCE, P. E. M.; ASCE, M. B. C. Wind tunnel studies on sawtooth and monosloped roofs. **Journal of structural engineering**, v. 136:1161-1171. September, 2010.
- STATHOPOULOS, T.; MOHAMMADIAN, A. R. Wind loads on low buildings with mono-sloped roofs. **J. Wind. Eng. Ind. Aerodyn.**, v. 23 (1-3), 81-97, 1985.
- STATHOPOULOS, T.; SAATHOFF, P. Codification of wind pressure coefficients for sawtooth roofs. **Journal of wind engineering and industrial aerodynamics**, 41-44, 1727 – 1738, 1992.
- TORRES, D.; ADELINO, T.; BITTENCOURT, L. Análise da utilização de *sheds* como estratégia passiva de ventilação em casa geminada. XII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUIDO e VIII ENCONTRO LATINOAMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUIDO. **Anais...** Brasília: ENCAC. CD-ROM, 2013.
- YANG, T. **CFD and field testing of a naturally ventilated full-scale building**. 2004. Tese (doutorado) – School of Civil Engineering, The University of Nottingham, Nottingham, 2004.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelo financiamento da presente pesquisa, processo n° 2011/11376-6.