



ANÁLISE COMPUTACIONAL DA AÇÃO DO VENTO SOBRE ESTRUTURA EM CASCA DE FORMA LIVRE TRIANGULAR

Caio Cesar dos Reis Raja

Isaias Vizotto

caioraja@gmail.com

vizotto@fec.unicamp.br

UNICAMP- Universidade Estadual de Campinas

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

Av. Albert Einstein, 951 – Cidade Universitária Zeferino Vaz – Barão Geraldo

CEP 13.083-852, Campinas, SP, Brasil

Resumo. *Esse artigo visa apresentar os coeficientes de pressão para uma estrutura em casca de forma livre triangular apoiada em seus vértices. A forma foi gerada utilizando o Método dos Elementos Finitos combinado com programação matemática desenvolvido por Vizotto (1993) que se baseia na teoria da membrana e no Princípio da Mínima Energia Potencial Total para determinar a geometria de estruturas em casca de formas livres. Em seguida são apresentadas as etapas para uma análise computacional realizada por meio do módulo CFX do software Ansys® para três casos de incidência do vento sobre a casca triangular. Os resultados encontrados demonstraram a possibilidade de utilização da análise fluidodinâmica computacional para o estudo de outras cascas de formas livres, com o propósito de compreender o comportamento estrutural sob esse tipo de ação e para obter os respectivos coeficientes de pressão.*

Palavras chave: *Cascas de formas livres, Fluidodinâmica computacional, Coeficientes de pressão.*

1 INTRODUÇÃO

As estruturas em casca são soluções utilizadas na engenharia para projetos de coberturas com grandes vãos em obras de complexos industriais, comerciais e públicas. Além disso, elas representam um elemento estrutural com grande cunho estético no ponto de vista arquitetônico. O avanço da tecnologia envolvida na produção do concreto e também das ferramentas computacionais possibilitaram boas perspectivas técnicas para a utilização dessas estruturas nos últimos anos.

Para este tipo de estrutura, a concepção geométrica é fundamental a fim se obter a melhor eficiência estrutural. O estado de tensão que ocorre depende diretamente da forma da estrutura, dos carregamentos atuantes e também das condições de contorno e vinculação. O estado de tensão otimizado para essas estruturas é o de compressão pura, de acordo com a teoria da membrana desenvolvida por Timoshenko (1964).

Em contrapartida, deve-se aprofundar o estudo do comportamento destas estruturas em relação aos esforços causados pela ação do vento, pois estruturas não convencionais, como a analisada nesse artigo não sendo abordadas em normas de projetos.

Diversas pesquisas analisando a ação do vento sobre as estruturas utilizando simulações computacionais têm sido realizadas ao longo do tempo. Meroney et al. (2002) apresentou um modelo numérico de um domo esférico sujeito aos esforços do vento sob diversos parâmetros aerodinâmicos. Seus resultados foram obtidos para três direções de atuação do vento com diferentes valores de turbulência e números de Reynolds. Vizotto e Ferreira (2014) realizaram um estudo da ação do vento sobre uma casca de forma livre com planta hexagonal apoiada em suas extremidades. O trabalho fez uma comparação entre uma simulação numérica computacional e um ensaio experimental realizado em um túnel de vento para diversos ângulos de atuação do vento. De forma semelhante, Galter et al. (2015) apresentou um trabalho com o mesmo intuito, utilizando uma casca de forma livre com planta pentagonal apoiada sobre os seus vértices.

Este artigo visa expor informações para a construção de um modelo fluidodinâmico computacional para a determinação dos coeficientes de pressão externos e internos de uma estrutura em casca de forma livre com planta triangular, apoiada em seus vértices, e submetida à ação do vento sob determinadas condições de contorno e vinculação para que possam servir como parâmetros de estudo em projetos deste tipo de estruturas não convencionais.

O programa computacional para a geração da casca de forma livre foi desenvolvido por Vizotto (1993), inspirado nos métodos de modelos em escala reduzida desenvolvidos por Heinz Isler para a geração de cascas de formas livres utilizando modelos físicos em laboratório.

O modelo computacional para análise da ação do vento sobre a casca foi gerado utilizando o módulo CFX do software ANSYS, que utiliza do Método dos Volumes Finitos como forma de solucionar as *Equações de Navier-Stokes* para fluídos incompressíveis e isotérmicos.

2 GERAÇÃO COMPUTACIONAL DA CASCA DE FORMA LIVRE

O modelo computacional desenvolvido por Vizotto (1993) que foi utilizado para a geração da casca de forma livre triangular é aplicado para a simulação de uma membrana isotrópica flexível, inicialmente no plano horizontal, com o formato e as condições de contorno visando gerar a estrutura de acordo com a teoria da membrana.

Para sua utilização foi considerada a linearidade da relação entre tensão e deformação conforme se observa na Eq. (1).

$$\sigma = D\varepsilon \quad (1)$$

onde σ e ε são vetores e D a matriz do estado plano de tensão descritos pelas Eq. (2) - (4):

$$\sigma^t = [\sigma_{xx} \quad \sigma_{yy} \quad \sigma_{xy}] \quad (2)$$

$$\varepsilon^t = [\varepsilon_{xx} \quad \varepsilon_{yy} \quad \varepsilon_{xy}] \quad (3)$$

$$D = \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu) \end{bmatrix} \quad (4)$$

sendo E o modulo de Young e ν o coeficiente de Poisson.

O elemento triangular utilizado no programa é uma modificação do CST (*Constant Strain Triangle*) que considera a hipótese de tensão e deformação constantes. O elemento adotado apresenta deslocamentos ortogonais em relação ao seu plano, obtendo-se assim um elemento com nove graus de liberdade, sendo três deslocamentos para cada nó nos vértices do triângulo. A representação do elemento com os respectivos graus de liberdade são mostrados na Fig. 1.

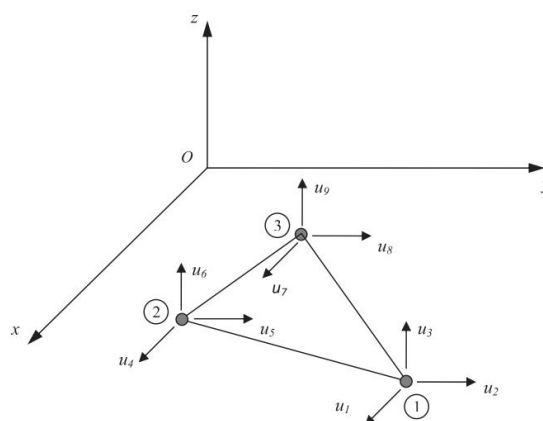


Figura 1. Elemento finito triangular CST (Fonte: Vizotto, 1993).

As funções de interpolação com as coordenadas x e y para o deslocamento do elemento são mostradas na Eq. (5):

$$\begin{aligned}u_x(x, y) &= \alpha_1 x + \beta_1 y + \gamma_1 \\u_y(x, y) &= \alpha_2 x + \beta_2 y + \gamma_2 \\u_z(x, y) &= \alpha_3 x + \beta_3 y + \gamma_3\end{aligned}\tag{5}$$

com as expressões α_k , β_k e γ_k referentes às coordenadas e deslocamentos iniciais dos pontos nodais, sendo elas apresentadas na Eq. (6):

$$\begin{aligned}\alpha_k &= c_{11}u_k + c_{12}u_{k+3} + c_{13}u_{k+6} \\ \beta_k &= c_{21}u_k + c_{22}u_{k+3} + c_{23}u_{k+6} \\ \gamma_k &= c_{31}u_k + c_{32}u_{k+3} + c_{33}u_{k+6}\end{aligned}\tag{6}$$

As constantes c_{ij} ($i=1,2,3$; $j=1,2,3$) são mostradas na Tabela 1:

Tabela 1. Expressões das constantes c_{ij} (Fonte: Vizotto, 1993).

Constantes c_{ij} para as expressões α_k , β_k e γ_k		
$c_{11} = (y_2 - y_3)/\delta$	$c_{12} = (y_3 - y_1)/\delta$	$c_{13} = (y_1 - y_2)/\delta$
$c_{21} = (x_3 - x_2)/\delta$	$c_{22} = (x_1 - x_3)/\delta$	$c_{23} = (x_2 - x_1)/\delta$
$c_{31} = (x_2y_3 - x_3y_2)/\delta$	$c_{32} = (x_3y_1 - x_1y_3)/\delta$	$c_{33} = (x_1y_2 - x_2y_1)/\delta$
$\delta = [(x_1y_2 + x_2y_3 + x_3y_1) - (x_1y_3 + x_2y_1 + x_3y_2)]$		

Considerando um elemento com material homogêneo e isotrópico no estado plano de tensão (o elemento está inicialmente localizado no plano xy) e a equação quadrática de deformação definida por Green, é possível representar as componentes das deformações ε_{xx} , ε_{yy} e ε_{xy} , conforme se observa na Eq. (7):

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \left(\frac{\partial u_x}{\partial x}\right) + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial x}\right)^2 \right] \\ \varepsilon_{yy} &= \left(\frac{\partial u_y}{\partial y}\right) + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial y}\right)^2 \right] \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial u_y}{\partial x}\right) + \left(\frac{\partial u_x}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial u_x}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial u_y}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial u_y}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial u_z}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial u_z}{\partial y}\right) \right]\end{aligned}\tag{7}$$

A energia potencial de deformação $\pi(u)$, considerando um elemento com volume V indeformável e com espessura constante, pode ser calculada a partir expressão mostrada na Eq. (8):

$$\pi(u) = \frac{1}{2} \int_V (\sigma^t \varepsilon) dV = \frac{1}{2} \int_V (\varepsilon^t D \varepsilon) dV = \frac{1}{2} V (\varepsilon^t D \varepsilon) \quad (8)$$

Para a geração da forma da casca com o modelo computacional foi considerada a ação do peso próprio da estrutura ao longo da superfície da membrana. Os carregamentos atuantes na estrutura são definidos por uma função $f(u)$, em que u que representa todos os deslocamentos nodais da estrutura.

Para simular as condições de contorno nas regiões dos apoios fixos foram considerados deslocamentos nulos nos nós dos respectivos elementos, restringindo-se assim os graus de liberdade da região.

De acordo com o Princípio da Mínima Energia Potencial Total, as posições de equilíbrio correspondem aos pontos mínimos da função de Energia Potencial Total. Sendo u o vetor com deslocamentos desconhecidos e f o vetor com as forças nodais, a função da Energia Potencial Total $\Pi(u)$ é definida conforme se observa na Eq. (9):

$$\Pi(u) = \Pi_0 + \sum [\pi(u)] - f^t u \quad (9)$$

onde Π_0 é a Energia Potencial Total (constante) e $\pi(u)$ é uma função da Energia Potencial dos elementos. O gradiente da Energia Potencial é mostrado na Eq. (10):

$$\nabla \Pi(u) = \sum [\nabla \pi(u)] - f \quad (10)$$

Segundo Vizotto (1993), para o caso em que a função da Energia Potencial Total existe, é utilizado o método quase-Newton para a obtenção do mínimo local, sendo que essa ferramenta não necessita da matriz de rigidez para sua solução. No caso em que a função da Energia Potencial Total não existe, é utilizado o método de Newton-Raphson para resolver as equações não lineares obtidas a partir do equilíbrio mostrado na Eq. (11):

$$\sum [\nabla \pi(u) - f] = 0 \quad (11)$$

A partir do modelo computacional apresentado é possível simular a deformação de membranas isotrópicas a partir de diversos tipos de solicitações e condições de contorno. Desse modo, é possível criar a estrutura em casca sem a presença de momentos fletores, apresentando apenas o comportamento de membrana para a ação do peso próprio. A partir deste modelo foi gerada uma casca de forma livre com planta triangular apoiada nos seus vértices sofrendo a ação do peso próprio (Fig. 2).

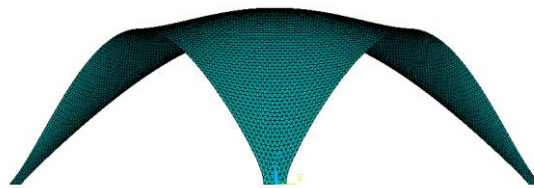


Figura 2. Casca de forma livre triangular.

3 MODELAGEM FLUIDODINAMICA COMPUTACIONAL DA AÇÃO DO VENTO NA CASCA DE FORMA LIVRE

A utilização da análise computacional permite ao projetista encontrar uma solução numérica para um problema de fluidodinâmica a partir da resolução das equações de *Navier-Stokes*, que relacionam o transporte de massa, momento e energia cinética dos fluidos em um espaço e tempo determinados. As análises deste trabalho serão realizadas utilizando o módulo de fluidodinâmica computacional CFX do software *Ansys®* que utiliza a resolução das equações de transporte a partir do Método de Volumes Finitos.

Seguindo a metodologia proposta por Hirsch (2007), a análise numérica foi realizada a partir de três etapas essenciais:

- Pré-processamento: etapa em que são definidas as condicionantes do processamento como geometria, descrição do domínio, tipo de malha, tipo de escoamento, condições de contorno, critério de convergência, entre outros;
- Solução do sistema: etapa do processamento de dados, fazendo-se a análise sobre o cumprimento dos critérios de convergência;
- Pós-processamento: etapa em que ocorre a visualização dos resultados obtidos nas etapas anteriores. Nesta etapa é possível realizar a verificação da coerência dos resultados mediante as condições de contornos impostas nas configurações do modelo.

As análises numéricas foram realizadas considerando algumas hipóteses básicas:

- Fluido em escoamento no regime permanente;
- Sistema isotérmico;
- Ar sendo considerado um fluido incompressível;
- Fluido em análise possuindo apenas uma única fase;
- Consideração do ar como sendo um fluido Newtoniano.

A seguir são mostrados todos os passos realizados durante a análise numérica para a obtenção dos coeficientes de pressão da estrutura em casca de forma livre triangular.

3.1 Configuração do domínio para a análise numérica

A primeira fase na etapa de pré-processamento corresponde a definição da geometria e também do domínio em que será realizada toda a análise. A casca triangular, mostrada na Fig. 3, possui altura H de 8m, comprimento entre apoios L de 23m, e espessura de 10cm.

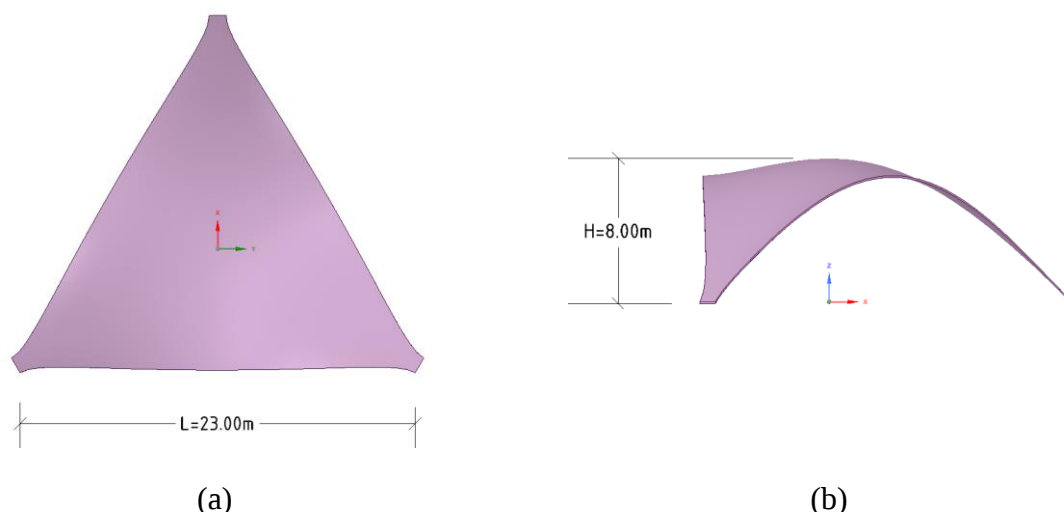


Figura 3. Dimensões da casca: (a) vista em planta; (b) vista lateral.

Para o dimensionamento do domínio é necessário manter uma distância mínima suficiente para que não exista interferência entre suas faces com a estrutura. Essas dimensões variam conforme recomendações de diversos autores. Como exemplo, algumas diretrizes gerais de modelagem em CFD para ambientes urbanos foram apresentadas por Franke et al. (2007). Neste artigo serão utilizadas as seguintes distâncias mínimas para a criação do domínio, sendo H a cota máxima da casca triangular: $5H$ entre o topo da casca e o topo do domínio, $5H$ entre as faces laterais do domínio e a estrutura; $5H$ entre a face de entrada do fluxo de ar e a estrutura e, $15H$ entre a face de saída do fluxo de ar e a estrutura. A configuração final do domínio pode ser observada na Fig. 4.

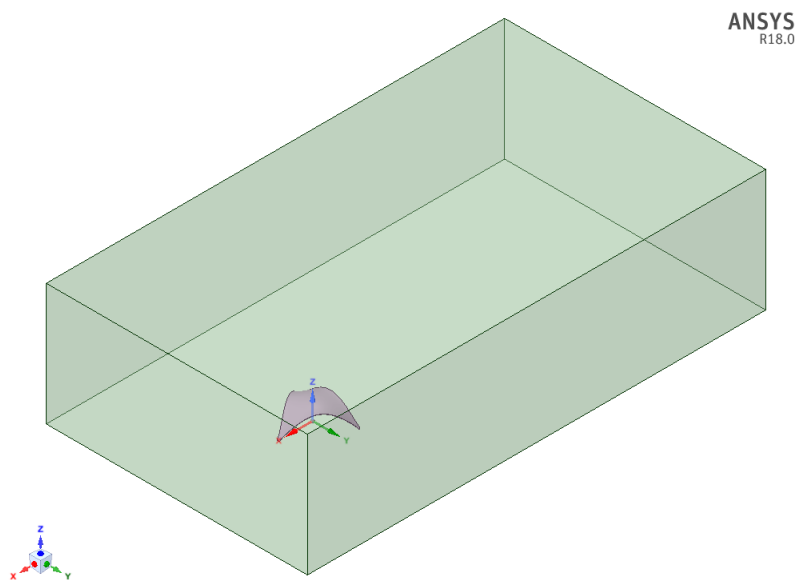


Figura 4. Vista isométrica do domínio em que será feita a análise numérica.

O próximo passo na etapa de pré-processamento está relacionado com a discretização do domínio em volumes finitos. Nesta etapa, optou-se pela utilização do gerador da malha do FLUENT, pois ele apresenta uma menor taxa de transição na geração dos elementos em

relação ao CFX (0,272 e 0,77, respectivamente), garantindo melhores resultados nos parâmetros que medem a qualidade da malha.

Além disso, optou-se pela utilização de dois tipos de elementos distintos ao longo do domínio. Nas regiões distantes da casca, onde o domínio apresentava uma geometria mais simples, foram utilizados elementos hexaédricos, visto que eles apresentam uma solução mais rápida e com maior precisão nas regiões onde o fluxo atinge perpendicularmente os elementos. Além disso, seu formato naturalmente faz com que seja necessária uma menor quantidade de elementos para cobrir a região desejada. Por outro lado, na região mais próxima da casca, local com uma geometria mais complexa, optou-se pela utilização de elementos tetraédricos. Este tipo de elemento é o mais eficiente em regiões de maior complexidade onde são exigidos maiores detalhamentos. Na Fig. 5 é mostrada a configuração final da malha em que será realizada a análise numérica.

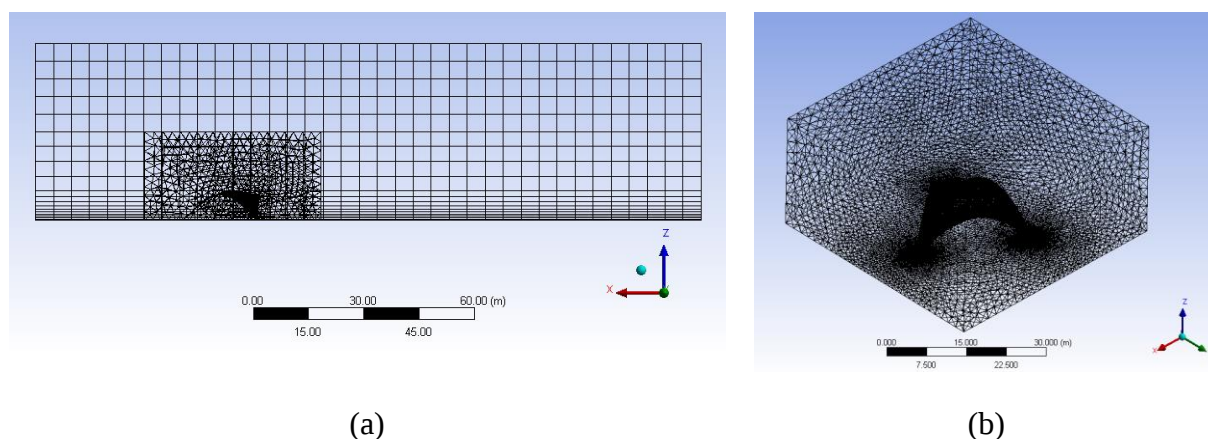


Figura 5. Discretização do domínio. (a) vista lateral. (b) região central com elementos tetraédricos.

Refinamentos locais nas regiões das faces da casca também foram realizados como forma de otimizar a qualidade da malha nas proximidades das regiões críticas (bordas da casca e região dos apoios). Na região da camada limite também foi realizado um refinamento específico com elementos hexaédricos para garantir a melhor representação do gradiente de pressão presente nessa região. Este refinamento recebe o nome de *Inflation* e sua disposição pode ser visualizada na Fig. 6.

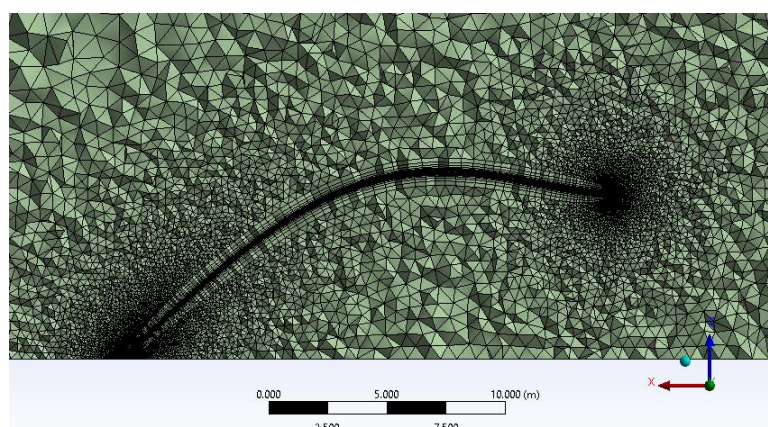


Figura 6. Corte com a representação do refinamento ao longo da camada limite.

Para verificar a qualidade da malha criada foram analisados três parâmetros, a saber: raio de aspecto, *skewness* e ortogonalidade. O raio de aspecto é definido pela razão entre o raio do círculo circunscrito e o raio do círculo inscrito no elemento tridimensional, conforme pode se visualizar na Fig. 7. Segundo recomendações do *Ansys*, valores da razão próximos de 1,0 indicam uma boa qualidade malha com elementos mais uniformes.

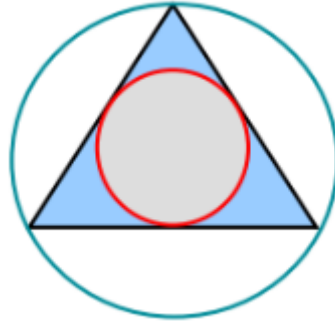


Figura 7. Raio de aspecto. (Fonte: Gonçalves, 2017).

Skewness é um parâmetro que mede o quão próximo a face do elemento analisado está do ideal (equilátero). Este parâmetro pode ser calculado pelo desvio do volume de um triângulo equilátero, conforme é mostrado na Fig. 8. Na Fig. 9 é mostrado um diagrama com a escala da qualidade da malha em relação a esse parâmetro.

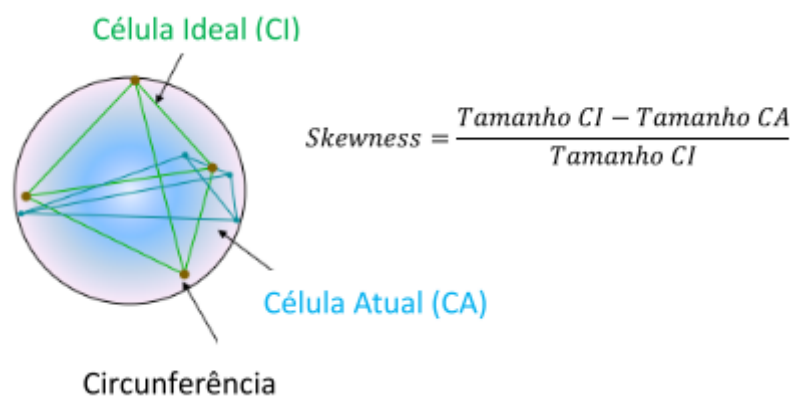


Figura 8. *Skewness* - desvio de volume de um triângulo equilátero. (Fonte: Gonçalves, 2017).

Excelente	Muito bom	Bom	Aceitável	Ruim	Inaceitável
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

Figura 9. Escala de qualidade do *skewness*. (Fonte: Ansys®).

A ortogonalidade é calculada utilizando os vetores normais para cada face do elemento $\vec{A}_i$; o vetor $\vec{c}_i$ do centroide do elemento ao centroide dos elementos adjacentes, e o vetor $\vec{f}_i$ que é obtido a partir do centroide do elemento até suas faces. A disposição desses vetores sobre o elemento pode ser visualizada na Fig. 10. Na Fig. 11 é mostrado um diagrama com a escala da qualidade da malha em relação a esse parâmetro.

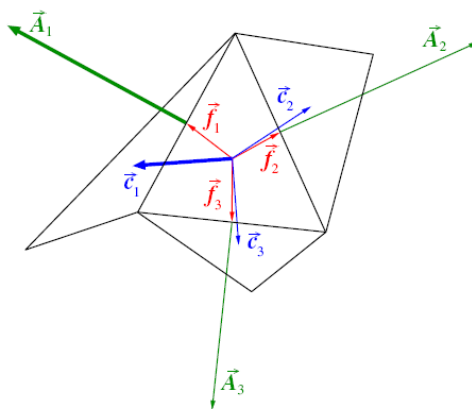


Figura 10. Disposição dos vetores na determinação da ortogonalidade. (Fonte: Ansys).

Inaceitável	Ruim	Aceitável	Bom	Muito Bom	Excelente
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Figura 11. Escala de ortogonalidade. (Fonte: Ansys®).

Um resumo com os principais resultados obtidos na criação da malha para os três ângulos de incidência do vento analisados são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Resumo dos parâmetros das malhas utilizadas na análise numérica.

Parâmetros	Incidência do vento		
	0°	30°	60°
Número de nós	3.007.425	3.001.861	3.003.469
Número de elementos	12.861.252	12.845.465	12.853.097
Raio de aspecto médio	2,432	2,435	2,431
Desvio padrão do raio de aspecto	4,256	4,331	4,278
Skewness médio	0,239	0,239	0,239
Desvio padrão do Skewness	0,137	0,138	0,138
Ortogonalidade média	0,858	0,858	0,858
Desvio padrão da ortogonalidade	0,101	0,101	0,101

3.2 Configuração do modelo de turbulência

Existem diversos modelos presentes nos softwares de CFD para simular a turbulência do fluido, sendo eles classificados em três categorias principais: *Direct Numerical Simulation (DNS)*, *Large Eddy Simulation (LES)* e *Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)*. As duas primeiras categorias apresentam elevada precisão nos seus resultados, porém, necessitam de grande capacidade computacional para serem usadas em problemas de engenharia.

Os modelos *RANS* apresentam bons resultados e necessitam de uma menor capacidade computacional. Dentro do *RANS*, o modelo $k - \varepsilon$, devido a sua simplicidade e robustez, é o mais utilizado para simular a turbulência nos problemas de engenharia. Entretanto, em regiões com camada limite curva, baixos números de Reynolds e locais de refluxo o modelo não apresenta resultados satisfatórios. Nesse sentido, o modelo SST (*Shear Stress Transport*) é o mais aconselhado quando se necessita de resultados mais precisos na região da camada limite. Seu cálculo é baseado num sistema de duas equações: $k - \varepsilon$ na região onde o escoamento é permanente e $k - \omega$ na região da camada limite, não se utilizando aproximações nessa região. Entretanto, para o modelo de casca analisado nesse trabalho, ensaios preliminares mostraram resultados satisfatórios com a utilização de uma versão modificada do modelo $k - \varepsilon$, denominada *RNG k - ε*. Nesses testes foram obtidos resultados próximos aos do modelo SST com um menor custo computacional. Com isso, optou-se pela utilização do modelo *RNG k - ε* em toda a análise numérica desse trabalho.

O modelo *RNG k - ε* é derivado das equações de *Navier-Stokes* a partir de uma técnica estatística denominada de método de escalas múltiplas, ou grupos de renormalização, que explica os efeitos de menores escalas de movimento. Segundo Yakhot et al. (1992), este modelo é semelhante ao $k - \varepsilon$ padrão, porém ele apresenta diferentes constantes e também funções adicionais nas equações de energia cinética (k) e dissipação (ε).

No caso do modelo $k - \varepsilon$ padrão, os valores de k e ε vem diretamente das equações diferenciais do transporte de energia cinética de turbulência (Eq. 12) e da taxa de dissipação de turbulência (Eq. 13).

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb} \quad (12)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{\varepsilon b}) \quad (13)$$

onde:

- k é a energia cinética de turbulência [$L^2 T^{-2}$];
- ρ é a densidade [$M L^{-3}$];
- U_j é o vetor velocidade [$L T^{-1}$];
- μ é a viscosidade dinâmica [$M L^{-1} T^{-1}$];
- ε é a taxa de dissipação de turbulência [$L^2 T^{-3}$];
- $C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, \sigma_k$ e σ_ε são constantes;

- μ_t é a viscosidade turbulenta, calculada a partir da Eq.(14):

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (14)$$

- P_k é turbulência produzida pelas forças viscosas, calculada a partir da Eq. (15):

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \left(3\mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} + \rho k \right) \quad (15)$$

- P_{kb} é um termo que vem a partir do modelo de flutuabilidade, calculada a partir da Eq. (16):

$$P_{kb} = - \frac{\mu_t}{\rho \sigma_\rho} g_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (16)$$

No caso do modelo $RNG\ k - \varepsilon$, constante $C_{\varepsilon 1}$ é substituída pela função $C_{\varepsilon 1RNG}$, e a equação de transporte para a dissipação de energia passa a ser calculada a partir da Eq. (17):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varepsilon) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon RNG}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1RNG} P_k - C_{\varepsilon 2} RNG \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1RNG} P_{\varepsilon b}) \end{aligned} \quad (17)$$

onde:

$$C_{\varepsilon 1RNG} = 1,42 - f_\eta \quad (18)$$

$$f_\eta = \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{4,38} \right)}{(1 + \beta_{RNG} \eta^3)} \quad (19)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{P_k}{\rho C_{\mu RNG} \varepsilon}} \quad (20)$$

- $\beta_{RNG}, C_{\mu RNG}$ são constantes.

Com a finalidade de se evitar um gasto excessivo de tempo e capacidade computacional, as regiões próximas de superfícies sólidas (superfícies da casca e do piso) foram calculadas utilizando o método *Wall functions*. Esta ferramenta consiste em utilizar fórmulas empíricas

para relacionar as variáveis correspondentes aos elementos do escoamento com as superfícies sólidas.

Para verificar a eficácia em utilizar *Wall functions* ao invés do cálculo direto nas regiões próximos às superfícies sólidas foram analisados os valores de Y^+ . Os resultados ao longo do eixo de simetria da casca são mostrados na Fig. 12, enquanto que a frequência sobre os valores de Y^+ em ambas as faces da casca são mostradas na Fig. 13.

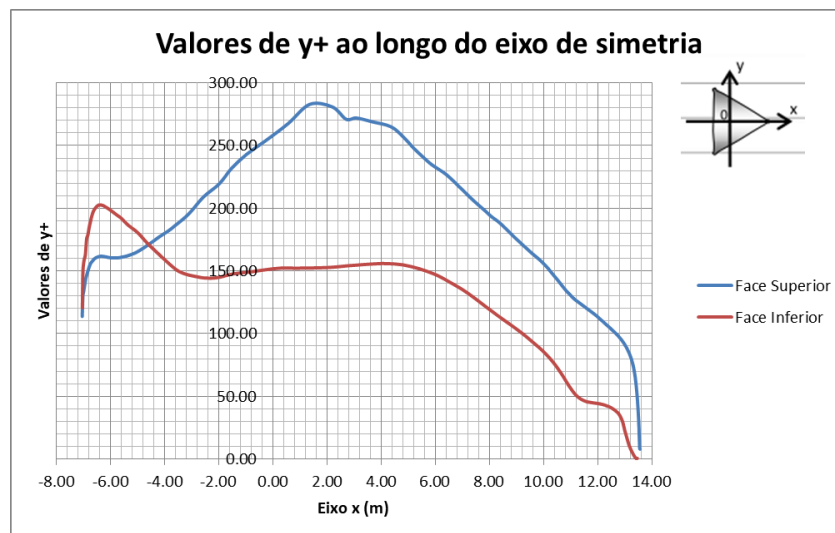


Figura 12. Perfis de Y^+ ao longo do eixo de simetria x .



Figura 13. Frequência da distribuição de Y^+ : (a) face superior; (b) face inferior.

O intervalo ideal de Y^+ para o modelo de turbulência *RNG $k - \varepsilon$* , segundo Rodrigues et al. (2017), é $30 \leq Y^+ \leq 300$. Observa-se, a partir da Fig. 13, que a utilização de *Wall functions* se mostrou totalmente válida para o modelo numérico analisado, com valores de 95% e 99% nas faces superior e inferior da casca, respectivamente.

3.3 Definição das condições de contorno

Na última etapa de pré-processamento foram inseridas as condições de contorno para o modelo. As propriedades físicas do ar utilizadas no trabalho são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Propriedades físicas do ar.

Propriedade	Sigla	Valor	Unidade
Massa Específica	ρ	1,184	kg/m ³
Viscosidade Dinâmica	μ	$1,85 \cdot 10^{-5}$	N.s/m ²
Viscosidade Cinemática	ν	$1,6 \cdot 10^{-5}$	m ² /s

A análise foi realizada em regime transiente com a velocidade do ar base de 20m/s. A Tabela 4 apresenta as principais configurações utilizadas pelo modelo.

Tabela 4. Condições de contorno da análise em regime turbulento.

Propriedades	Configuração utilizada
Regiões do domínio	<i>Inlet/Outlet/Floor/Wall/Shell</i>
Modelo de turbulência	<i>RNG k – ε</i>
Tipo de análise	Transiente
<i>Timesteps</i>	0,005 s
Número máximo de <i>timesteps</i>	5000
Fluido do domínio	Ar a 25°C
Pressão relativa	1 atm
Velocidade do fluido	20 m/s
Inicialização	Componentes cartesianas da velocidade: u = -20 m/s; v = w = 0 m/s Pressão relativa = 0 Pa Intensidade de turbulência = Baixa (intensidade = 1%)
Funções para o cálculo na região da camada limite (<i>Wall Functions</i>)	Escalável
Controle de convergência	<i>Min. coef. loops = 1/ Max coef. loops = 5</i>
Critério de convergência	Tipo de Residual = MAX/ Residual target = 1,0 E-4

É importante salientar que o critério de convergência foi inserido no modelo para acelerar o processamento, pois caso ele fosse atingido o *loop* que estava sendo analisado era interrompido, e o processamento passava para o próximo passo de tempo. O critério de parada escolhido no modelo foi o de número máximo de passos de tempo.

4 RESULTADOS

O coeficiente de pressão local em um ponto da superfície da casca é obtido a partir da proporção entre pressão dinâmica de superfície nesse ponto e a pressão dinâmica no fluxo a montante sob uma altura de referência. A expressão para o cálculo dos coeficientes de pressão nas faces superior e inferior da casca é mostrada na Eq. (21):

$$C_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} \quad (21)$$

onde:

- p é a pressão dinâmica local;
- p_0 é a pressão de referência sob o escoamento livre, sem a interferência que a casca exerce sobre o escoamento;
- V_0 é a velocidade de referência.

O processamento foi realizado para três direções de incidência do vento: 0° , 30° e 60° . As curvas isopletas com os respectivos coeficientes de pressão para os ângulos de incidência analisados podem ser visualizadas da Fig. 14 a Fig. 16.

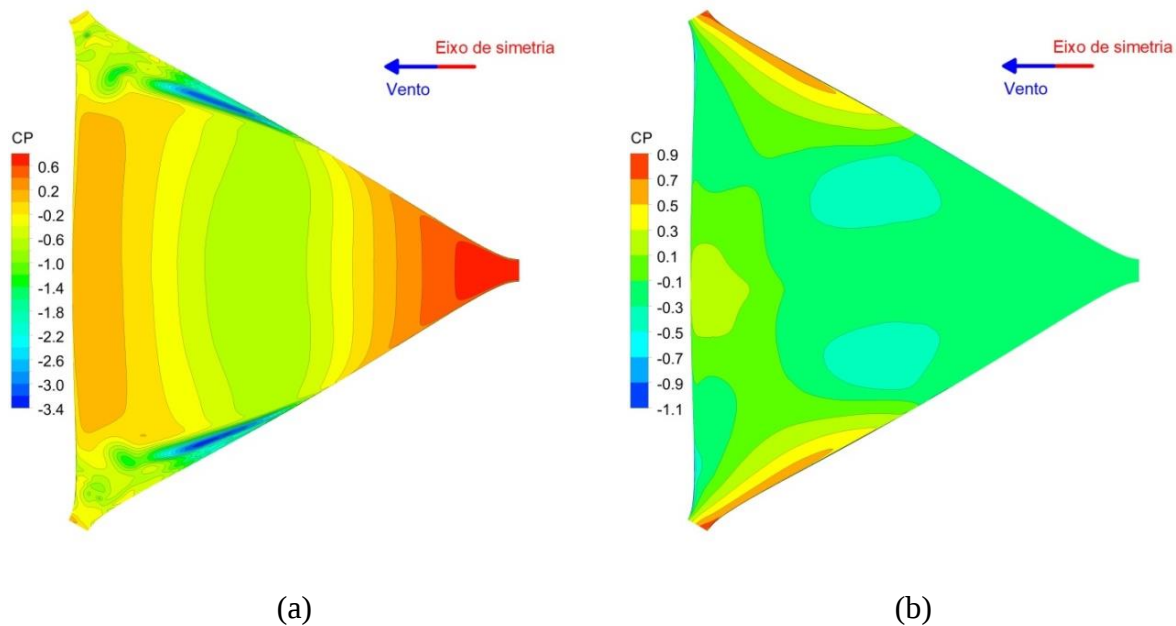


Figura 14. Coeficientes de pressão com o vento incidindo à 0° : (a) face superior; (b) face inferior.

Analizando o processamento para o caso de incidência de 0° , observa-se que os coeficientes de pressão positivos mais elevados na face externa da casca estão presentes no apoio que se encontra frontalmente ao fluxo (Fig. 14a). Após isso, os valores dos coeficientes de pressão vão diminuindo até atingirem seu ponto mais baixo, de forma simétrica, nas duas bordas laterais, posicionadas na direção do fluxo de escoamento. Em relação à face interna, observam-se predominantemente efeitos de sucção ($CP < 0$) ao longo de toda a superfície, com exceção das bordas laterais que possuem valores positivos de CP que se estendem aproximadamente sobre as mesmas regiões de pressão negativas presentes na face externa.

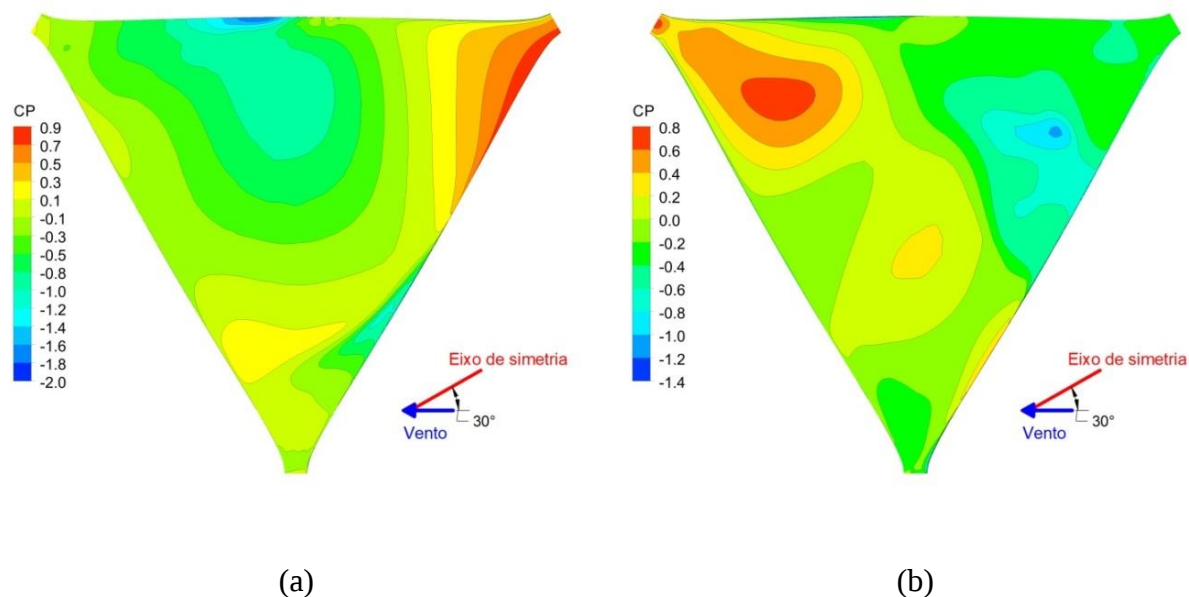


Figura 15. Coeficientes de pressão com o vento incidindo à 30° : (a) face superior; (b) face inferior.

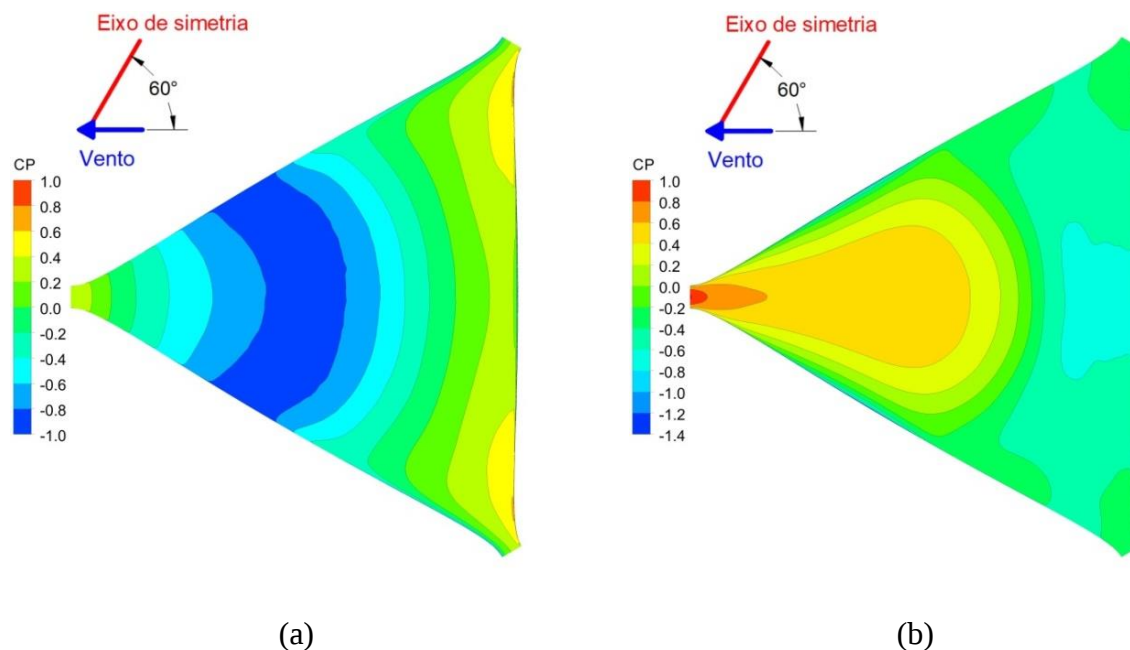


Figura 16. Coeficientes de pressão com o vento incidindo à 60° : (a) face superior; (b) face inferior.

Em relação ao caso de incidência de 30° , observa-se um comportamento intermediário entre as isopletas dos casos a 0° e 60° (Fig. 14 e Fig. 16, respectivamente). Analisando-se o caso de incidência à 60° , é possível observar que os maiores valores do coeficiente de pressão ocorrem em uma faixa estreita da borda frontal da superfície externa onde o escoamento atinge a casca triangular, e na região do apoio a jusante da superfície interna, também por causa do impacto do escoamento. Na região central, local de curvatura máxima da casca, observam-se os menores valores dos coeficientes de pressão na face externa da estrutura.

Para um melhor entendimento sobre o desenho das curvas isopletas, as linhas de corrente com a velocidade do escoamento para os três casos analisados podem ser visualizadas através da Fig. 17 a Fig. 19.

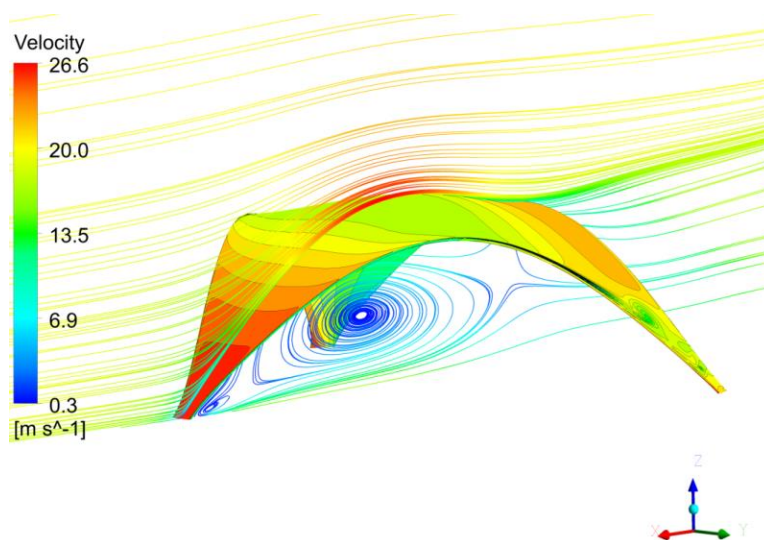


Figura 17. Linhas de corrente ao longo do plano XZ para o processamento com vento incidindo à 0° .

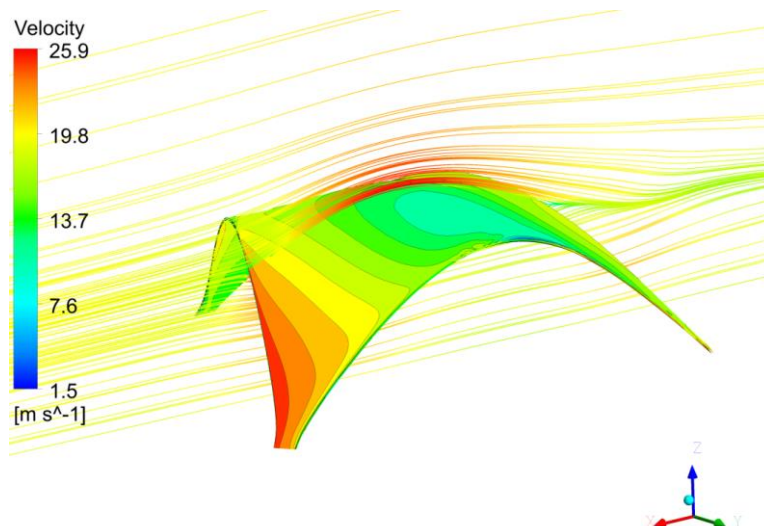


Figura 18. Linhas de corrente ao longo do plano XZ para o processamento com vento incidindo à 30° .

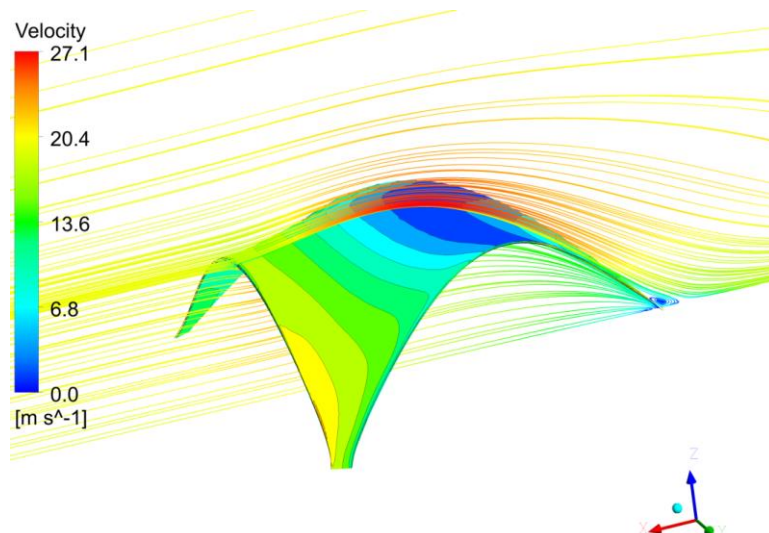


Figura 19. Linhas de corrente ao longo do plano XZ para o processamento com vento incidindo à 60°.

Os processamentos foram realizados em um computador Intel® Core™ i7-4790K CPU@ 4.00GHz com 32.0GB de memória RAM. O custo computacional para os três casos de incidência do vento pode ser visualizado na Tabela 5.

Tabela 5. Custo computacional.

Incidência do vento	Custo computacional [10^6 s]
0°	2,57
30°	1,67
60°	1,77

5 CONCLUSÕES

A determinação precisa dos esforços causados pelo vento se torna uma tarefa complexa quando a geometria da estrutura analisada é diferente das formas mais comuns apresentadas em normas ou regulamentações. A casca de forma livre analisada nesse trabalho faz parte desse grupo e deve receber uma atenção especial. Nesse tipo de situação é usual a realização de ensaios de túnel de vento em escala reduzida ou a utilização de modelos computacionais que façam a simulação dos efeitos causados pela ação do vento sobre a estrutura.

É importante ressaltar que o modelo computacional para a geração de cascas de formas livres se mostrou bastante eficiente para o que lhe foi proposto. O software *Ansys®* para a análise fluidodinâmica também apresentou resultados coerentes com a expectativa do comportamento dessas estruturas sob a ação do vento, tendo os efeitos de pressão e sucção da estrutura em conformidade com o fluxo e a intensidade do escoamento, para os três diferentes casos de incidência do vento analisados. A validação dos resultados por via de ensaio em túnel de vento está em andamento e será apresentada em um próximo trabalho.

Por fim, os ensaios de túnel de vento são importantes na análise dos esforços causados pelo vento sobre as estruturas. Contudo, o rápido avanço computacional e da modelagem numérica em CFD acaba se tornando uma solução cada vez mais atrativa para esse tipo de análise, principalmente nos casos em que a limitação física impossibilita a adequação do modelo em escala reduzida com a situação real.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar o agradecimento aos meus parceiros do Departamento de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP, em especial ao Prof. Dr. Isaias Vizotto e também ao Prof. Dr. Cilmar Donizeti Basaglia, pelos conhecimentos adquiridos e também pela infraestrutura disponibilizada para a realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- NBR6123, A.B.N.T., 1988. Forças devidas ao vento em edificações. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, Rio de Janeiro.
- Ansys, C.F.X., 2017. Solver theory guide. *Ansys CFX Release*, 18.
- Ferreira, A. M., 2013. *Análise de Estruturas em Cascas de Formas Livres sob a Ação do Vento*. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas.
- Fox, R., McDonald, A., Pritchard, P., 2010. Introdução a Mecânica dos Fluidos. 8a ed, LTC.
- Franke, J., Hellsten, A., Schlunzen, H., Carissimo, B., 2007. Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment. *COST Action: Quality assurance and improvement of microscale meteorological models*.
- Galter, M. D., Vizotto, I., Ferreira, A. M., Cardenas, S. M., 2015. Ação do vento em modelo reduzido de casca de forma livre de planta pentagonal apoiada nos vértices. *XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*.
- Gonçalves, J. F., 2017. *Efeitos de vizinhança nas ações do vento em edifícios com coberturas em duas águas*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas.
- Hirsch, C., 2007. Numerical Computation of Internal and External Flows: The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics. 2a ed, Elsevier.
- Isler, H., 1986. Concrete shells and architecture. *IASS symposium on membrane structures and space frames, bulletin IASS 91*. Osaka.
- Isler, H., 1997. Experience with non-geometric shells. *International symposium on shell & spatial structures – design, construction, performance & economics*. Singapore: Nanyang Technological University.
- Meroney, R. N., Letchford, C. W., Sarkar, P. P., 2002. Comparison of numerical and wind tunnel simulation of wind loads on smooth, rough and dual domes immersed in a boundary layer. *Wind Struct.*

- Menter, F. R., 1994. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, vol. 30, pp. 1657-1659.
- Munson, B. R., Young, D. F., & Okiishi, T. H., 2004. Fundamentos da mecânica dos fluidos. *Blucher*.
- Rodrigues, A. M., Tomé, A., Gomes, M. G., 2017. Computational study of the wind load on a free-form complex thin shell structure. *Techno Press*, vol. 25.
- Timoshenko, S. P., Woinowsky-Krieger, S., 1964. Theory of plate and shell structures. 2a ed. *McGraw-Hill Higher Education*.
- Vizotto, I., 1993. *Geração computacional de formas livres de estruturas em casca*. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.
- Vizotto, I., Ferreira, A. M., 2014. Wind force coefficients on hexagonal free form shell. *Engineering Structures*. Elsevier.
- Yakhot, V., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski, T. B., Speziale, C. G., 1992. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Phys Fluids*.