



AÇÃO DO VENTO EM MODELO REDUZIDO DE CASCA DE FORMA LIVRE DE PLANTA PENTAGONAL APOIADA NOS VÉRTICES

Marcelo Deperon Galter

Isaias Vizotto

Antônio Mário Ferreira

Sebastian Moreno Cardenas

galter.engenharia@gmail.com

vizotto@fec.unicamp.br

bfengenharia@bfengenharia.com

smoreno@feq.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. Este artigo tem como principal objetivo o estudo do comportamento de uma estrutura em casca de forma livre de base pentagonal apoiada nos cinco vértices sob a ação do vento, através dos coeficientes de pressão obtidos de análises em túnel de vento de modelos físicos reduzidos e por meio de simulações computacionais. Primeiramente, o modelo foi gerado através do programa computacional desenvolvido por Vizotto (1993), cuja finalidade é a geração de formas otimizadas de estruturas em casca de formas livres, combinando o método de elementos finitos com técnicas de programação matemática. O modelo foi construído em escala reduzida e submetido aos ensaios em túnel de vento para geração da camada limite e extração dos coeficientes de pressões internos e externos para os regimes de fluxo laminar e turbulento. Nos ensaios foram consideradas importantes combinações de incidências da ação do vento e aberturas dominantes na estrutura, sendo os resultados apresentados em gráficos de curvas isobáricas. Finalmente, todos os ensaios realizados foram simulados computacionalmente por meio do programa ANSYS, utilizando o módulo fluidodinâmico computacional CFX com a formulação SST para os modelos em regime de fluxo turbulento, mantendo todas as condições de contorno do túnel de vento e comparados com os ensaios obtidos experimentalmente.

Palavras chave: Estruturas em casca, Túnel de vento, Coeficientes de pressão, Fluidodinâmica computacional.

1 INTRODUÇÃO

Estruturas em casca são estudadas amplamente em diversos setores da engenharia, inclusive na Engenharia Civil, para uso em edificações como coberturas de igrejas, hangares, pavilhões, etc. As características destas estruturas permitem a aplicação em projetos inovadores, permitindo alcançar grandes vãos livres, além de oferecer uma alta resistência, economia nos materiais, boa acústica e flexibilidade de utilização.

As estruturas em casca possuem algumas características elementares, por exemplo, apresentam uma dimensão (espessura) muito menor em relação às outras dimensões e geometria tridimensional de superfície curva variável. O estado de tensão ideal é de compressão pura, em que as cascas suportam os carregamentos principalmente através do comportamento de membrana, que depende da sua geometria e das condições de apoio, apresentando esforços de compressão no plano tangente em cada ponto da superfície média, teoria desenvolvida por G. B. Airy e A. E. H. Love no século XIX (*apud* Brandão, 2005).

No entanto, é necessário aprofundar o estudo do comportamento destas estruturas em relação às ações do vento, pois as formas geométricas muitas vezes não são convencionais abordadas em normas.

A contribuição deste artigo é disponibilizar informações sobre os coeficientes de pressão externos e internos para uma estrutura em casca de forma livre de planta pentagonal, apoiada nos cinco vértices, e submetida à ação do vento em determinadas condições de contorno para que possam servir como parâmetros para o estudo e projeto destes tipos de estrutura, pois a norma NBR-6123 – Forças Devidas ao Vento em Edificações (1988) não contempla curvas isobáricas para as estruturas em casca de formas livres.

Inicialmente foram obtidos os coeficientes de pressões externos e internos para uma estrutura em casca de forma livre de base pentagonal, apoiada nos cinco vértices, através de ensaios de modelos experimentais submetidos à ação do vento, nos regimes de fluxo laminar e turbulento, em túnel de vento do LaCAF (Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada) da FEC/UNICAMP. Foram consideradas três posições de incidência do vento, com variações de aberturas dominantes da estrutura, com os resultados plotados em curvas isobáricas com a utilização do programa TopoCal.

Posteriormente, os ensaios também foram simulados computacionalmente com o módulo de fluidodinâmica CFX do software ANSYS, utilizando os mesmos critérios e condições de contorno empregados nos ensaios experimentais. Desta forma foi possível fazer uma comparação de resultados obtidos por meio dos ensaios realizados no túnel de vento e as simulações computacionais, a fim de verificar a compatibilidade e validação dos resultados apresentados por meio de curvas isobáricas.

2 TUNEL DE VENTO E MODELOS REDUZIDOS

De maneira geral, um túnel de vento é um aparato laboratorial com o objetivo de gerar um fluxo de ar controlado de acordo com a necessidade e limitações do experimento, a fim de se determinar experimentalmente o comportamento de modelos sob a ação do escoamento de ar, mensurando variáveis como pressão, velocidade, vetores de fluxo, etc.

Segundo Blessmann (2011), havendo semelhança geométrica, semelhança cinemática ou de movimento e semelhança dinâmica que corresponde às forças sobre os corpos em diferentes escalas, as pressões em pontos correspondentes do modelo e da edificação real são similares para quaisquer pontos considerados. Portanto, com as medidas de pressões em diferentes pontos do modelo, é possível conhecer as pressões nos pontos correspondentes da edificação real.

2.1 Túnel de vento

O túnel de vento que foi utilizado para os ensaios experimentais é apresentado de modo esquemático na Fig. 1, sendo parte integrante do LaCAF (Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada) da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). As principais especificações técnicas básicas do túnel de vento, com as características físicas de para geração de camada limite, são apresentadas a seguir (Matsumoto, 2008):

- Comprimento total de 9,03 m;
- Seção de ensaios de 4,8 m de comprimento, 0,90 m de largura, 0,80 m de altura, resultando numa área da seção transversal de 0,72 m²;
- Disco giratório, para fixação da maquete na seção de ensaio, de 0,60 m de diâmetro;
- Diâmetro das pás do ventilador de 1,20 m (16 pás);
- Motor elétrico com potência de 12,5 HP;
- Nove pontos de medida de pressão estática no teto da seção de ensaios;
- Velocidade máxima na seção de ensaio, com o túnel vazio, de 20 m/s a 850 rpm;
- Scanner de pressão modelo ESP-HD de 64 canais;
- Módulo de aquisição de dados: DTC Initium.

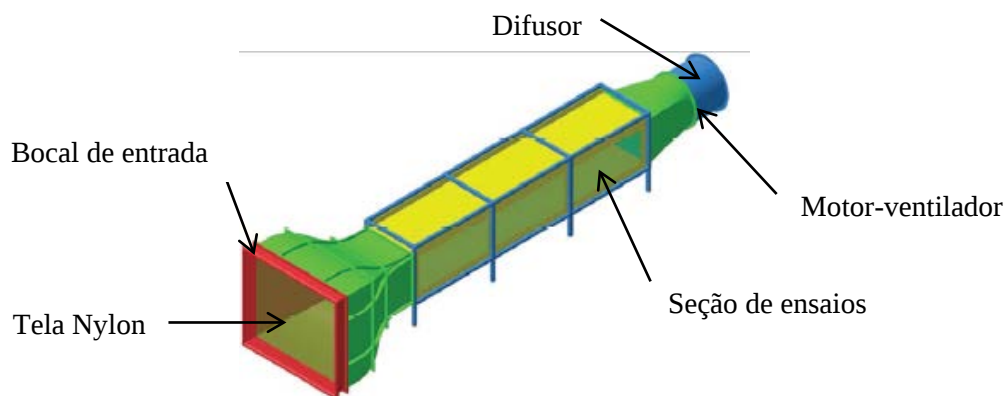


Figura 1. Ilustração esquemática geral do túnel de vento do LaCAF (UNICAMP)

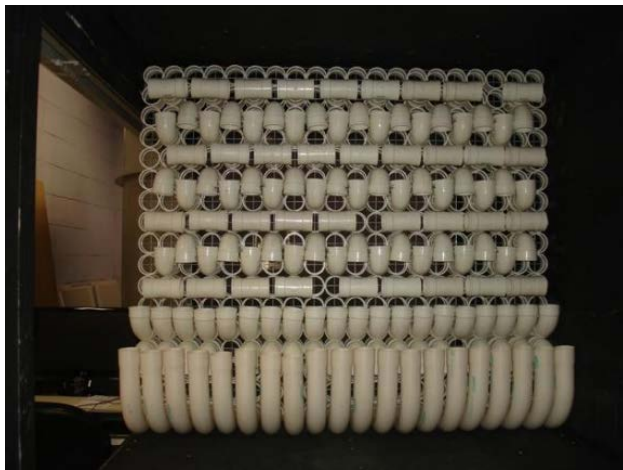
Para um fluxo turbulento é necessário simular o perfil de velocidade conforme a Eq. (1), e também a intensidade de turbulência da camada limite exposta na Eq. (2). Para obter este efeito, o túnel de vento possui um painel com tubos e conexões de PVC que é instalado na entrada da seção de ensaios do túnel, conforme apresentado na Fig. 2(a). Este painel altera o fluxo de vento e assim produz perfis de fluxo turbulento adequados para o tipo de rugosidade desejada. Neste trabalho foi utilizado o perfil de velocidade e turbulência equivalente a uma região periférica de uma cidade com obstáculos baixos ($\alpha=0,2$) apresentado na Fig. 2(b).

$$\frac{U_z}{U_{ref}} = \left[\frac{z}{Z_{ref}} \right]^\alpha \quad (1)$$

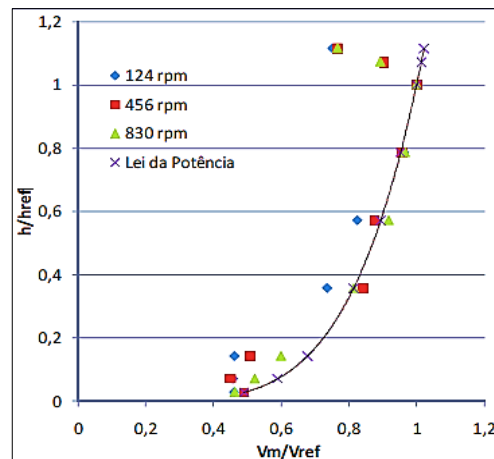
$$I_U = \frac{\sigma_u}{U_z} = \frac{1}{U_z} \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (u_i - U_z)^2} \quad (2)$$

onde:

- U_z : Velocidade média na altura z ;
- U_{ref} : Velocidade média na altura de referência;
- z : Altura média;
- Z_{ref} : Altura de referência;
- α : Expoente de rugosidade de simulação no túnel de vento LaCAF, sendo:
0,1 para rugosidade baixa; 0,2 para rugosidade média; 0,4 para rugosidade alta;
- I_u : Intensidade de turbulência;
- σ_u : Desvio padrão da componente flutuante;
- u_i : Componente flutuante da velocidade longitudinal.



(a)



(b)

Figura 2. (a) Painel gerador de fluxo turbulento; (b) Perfil de velocidade para superfícies com rugosidade média ($\alpha=0,2$)

2.2 Modelos Reduzidos

Ferreira (2013) gerou estruturas em casca de formas livres em sua tese de doutorado com as técnicas de otimização computacionais do programa desenvolvido por Vizotto (1993), que consiste em simular uma membrana sob a ação do peso próprio para obtenção da forma geométrica escolhida. Para confrontar os resultados, posteriormente as formas também foram

geradas utilizando o programa ANSYS, em seu módulo de análise estrutural no Laboratório de Informática da FEC-UNICAMP, sendo obtidas geometrias idênticas para as membranas finas simuladas sob ação do peso próprio. Dentre as formas geradas, para os ensaios em túnel de vento do trabalho atual foi adotado somente o modelo reduzido de estrutura em casca de forma livre com a geometria de planta pentagonal.

Para construção dos modelos reduzidos, as dimensões dos mesmos devem estar em escala de acordo com as especificações geométricas da secção transversal para os ensaios dentro do túnel de vento. Segundo Irwin (2013), é recomendado até 10% de bloqueio máximo da projeção da área do modelo em relação à área de teste do túnel de vento, sendo que deste modo evita-se a distorção do fluxo entre o modelo e as paredes do túnel de vento. Na construção dos modelos, foi adotado que o modelo poderia obstruir no máximo 7% da área total da secção transversal em uma escala de 1:100 do projeto real, conforme a Fig. 3.

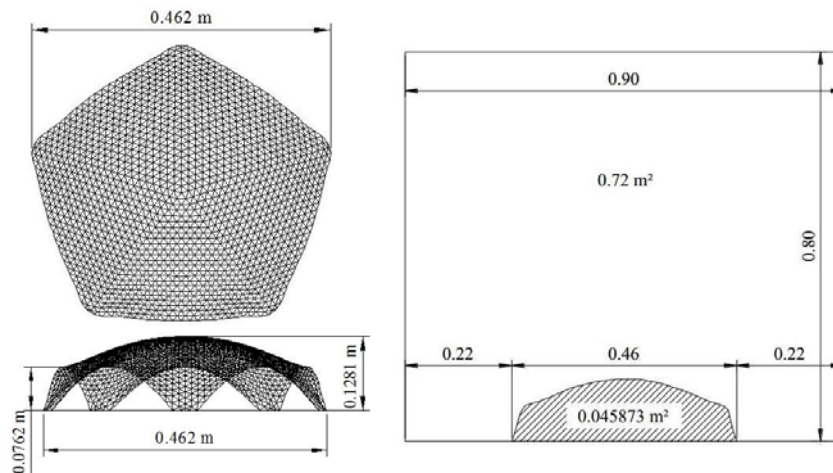


Figura 3. Modelo computacional de casca pentagonal e obstrução total de área da seção transversal

Ferreira (2013) desenvolveu o processo construtivo dos modelos reduzidos utilizando equipamentos do LAPAC (Laboratório de Automação e Prototipagem para Arquitetura e Construção) da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP. Neste laboratório foi utilizada a Fresadora CNC MTC Robótica (TAZ), com área de corte de 1500 x 2300 mm. Os modelos gerados numericamente foram transformados em linguagem CNC para a fresadora, onde foram esculpidas as peças em isopor de alta densidade. Após obter as peças em isopor esculpidas, as mesmas serviram como contra-fôrmas para os modelos que foram fabricados em concreto, e em seguida estes modelos em concreto serviram como fôrmas negativas para a modelagem das cascas em fibra de vidro, tendo uma forma final da casca com um acabamento liso com espessura de aproximadamente 4 mm (Fig. 4.)

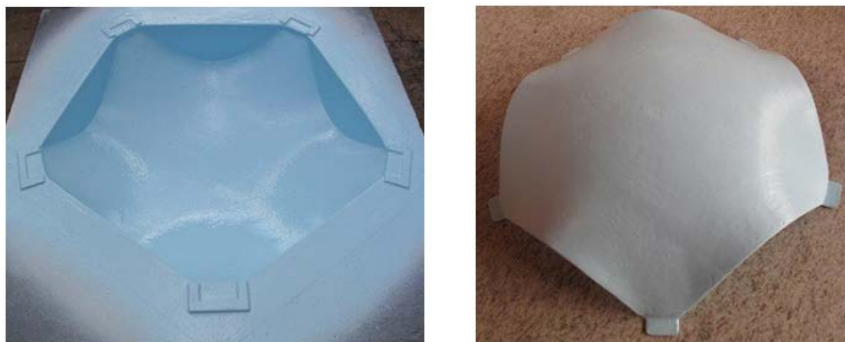


Figura 4. Contra-fôrma e modelo reduzido final em fibra de vidro

Após a construção de dois modelos em fibra de vidro, um para obtenção dos coeficientes de pressão internos e outro para coeficientes de pressão externos, os mesmos foram divididos em 61 pontos para colocação de sensores de pressão. Para cada sensor foi executado um furo devidamente numerado, e instalada mangueira de diâmetro interno de 1,0 mm e externo de 1,6 mm, para serem conectadas ao escâner de pressão do túnel de vento, visualizadas na Fig. 5.



Figura 5. Modelos reduzidos para obtenção dos coeficientes de pressão internos e externos

Para cada ensaio, os modelos reduzidos foram fixados numa base de madeira com 16 mm de espessura de forma circular, com o diâmetro de 0,60 m da base de fixação do túnel de vento, e as mangueiras foram conectadas ao módulo de aquisição de dados do escâner de pressão do túnel de vento. Para o modelo da casca referente à medição do coeficiente externo, as mangueiras passam por baixo da base, ficando todas na parte inferior para que no momento do ensaio as mangueiras possam permanecer na parte externa do túnel e não interfiram com a superfície da casca. Para o modelo da casca referente à medida de pressões internas, as mangueiras ficaram externas à casca e no momento do ensaio elas ficam presas a uma haste para minimizar ao máximo qualquer efeito do vento durante os ensaios que possam influenciar na leitura das pressões na superfície do modelo, conforme a Fig. 6.



Figura 6. Modelos posicionadas para os ensaios no túnel de vento do LaCAF

2.3 Ensaios no túnel de vento

Os ensaios foram realizados no tunel de vento do LaCAF considerando o modelo reduzido da casca de forma livre de planta pentagonal fechado e com uma e duas aberturas predominantes, em diferentes posições para incidência do vento (Fig. 7), tanto com fluxo em regime laminar como turbulento. Estas combinações foram adotadas de acordo com as recomendações e conceitos da NBR-6123 (1998) sobre as incidências mais críticas do vento para aberturas dominantes:

- Estrutura totalmente fechada e barlavento a 0°;
- Estrutura totalmente fechada e barlavento a 180°;
- Estrutura com uma abertura dominante a 0° e barlavento a 180°;
- Estrutura com duas aberturas dominantes, uma 0° e outra a 225°, e barlavento a 0°;
- Estrutura com duas aberturas dominantes, uma 0° e outra a 225°, e barlavento a 90°.

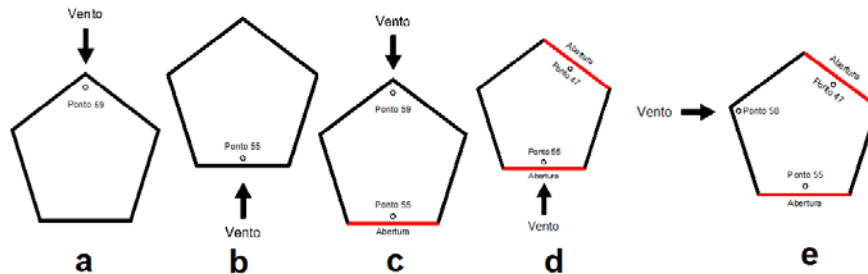


Figura 7. Situações arbitradas de incidência do vento na estrutura em casca de forma livre (planta)

Cada ensaio foi realizado com oito velocidades de rotação iniciando com 130 rpm (3 m/s), 230 rpm (5,5 m/s), 330 rpm (8 m/s), 430 rpm (10 m/s), 530 rpm (12,5 m/s), 630 rpm (15 m/s), 730 rpm (17 m/s) e 830 rpm (20 m/s), que é a velocidade máxima do ventilador do túnel de vento. Para cada velocidade o tempo total de coleta de dados foi de 2 minutos, com uma frequência de coleta de 100 leituras por segundo.

Para a obtenção dos coeficientes de pressão, após a coleta de dados pelo escâner que foi conectado juntamente com um módulo de aquisição de dados, foi processada a diferença de pressão em cada ponto sensor (p_p) em relação à pressão de referência do túnel de vento (p_{p0}), sendo esta coletada pelo próprio escâner com 0 rpm do ventilador na área de ensaios do túnel. Finalmente, foram obtidos os coeficientes dividindo-se esta diferença de pressões pela pressão do tubo de Pitot ou pressão dinâmica, conforme a Eq. (3):

$$cp = \frac{p_p - p_{p0}}{p_{dinâmica}} \quad (3)$$

onde:

- cp : Coeficiente de pressão (adimensional);
- p_p : Pressão em cada ponto (Pa);
- p_{p0} : Pressão de referência na câmara de ensaios com ventilador em repouso (Pa);
- $p_{dinâmica}$: Pressão do tubo de Pitot (Pa).

Os valores das pressões em cada ponto foram organizados e compilados em relação as suas respectivas velocidades de ensaios através de tabelas, e foi constatado que os coeficientes de pressão estabilizaram após o ventilador atingir a velocidade de 430 rpm. Desta forma foi possível fazer uma média de valores estabilizados dos coeficientes de pressão. Estes dados foram exportados para o programa de uso gratuito TopoCal 2012 (<http://www.topocal.com/>) através de um arquivo tipo texto, contendo as coordenadas cartesianas do modelo (eixos X e Y) e os coeficientes de pressão como o terceiro eixo dimensional (eixo Z), possibilitando a apresentação dos valores em curvas isobáricas.

3 ANÁLISE COMPUTACIONAL

Os ensaios com os modelos reduzidos em túnel de vento foram simulados computacionalmente com a utilização do módulo de fluidodinâmica CFX (*Computational Fluid Dynamics*) do software ANSYS, utilizando os mesmos critérios e condições de contorno empregados nos ensaios experimentais.

Com a análise computacional é possível encontrar uma solução numérica para um problema de interação fluidodinâmica com o uso das equações diferenciais de Navier-Stokes que regem o transporte de massa, momento e energia na movimentação dos fluidos em um domínio, espaço e tempo determinado.

3.1 Turbulência

A turbulência é caracterizada pelas flutuações instantâneas de velocidade, temperatura e outras grandezas escalares de um fluido em movimento; porém, devido às múltiplas variações imprevistas que o fluido pode ter durante o movimento, fica quase impossível descrever a turbulência em sua totalidade e realismo.

3.1.1 Modelagem da Turbulência

As equações de Navier-Stokes possuem uma boa aproximação para resolução de problemas de engenharia, inclusive problemas envolvendo turbulência. Conforme Munson (2004) estas equações foram descritas há muitos anos, porém existem poucas soluções analíticas conhecidas. Com o advento de computadores com grande capacidade de processamento, tornou-se possível soluções aproximadas para estas equações com aplicações a problemas variados.

Existem diversos modelos de turbulência, mas o utilizado neste trabalho foi o modelo SST (*Shear Stress Transport Model*) ou Método da Transição da Tensão de Cisalhamento, que possui uma excelente precisão para o fluxo da camada limite do regime laminar até a transição para o regime turbulento.

Desenvolvido por Menter (1994), o modelo SST é um modelo do tipo RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations*) ou Equações Médias de Reynolds que utiliza o equacionamento do modelo $k - \varepsilon$ que trata a parte da produção e dissipação de energia cinética turbulenta. Este por sua vez é um modelo robusto em relação a escoamentos complexos, mas não tem um bom comportamento na camada limite da superfície. Já nas regiões próximas as paredes, onde se tem presente a camada limite, é utilizado o modelo $k - \omega$ que é mais eficaz, pois trata a frequência dos turbilhões. Porém para descrição em escoamentos livres o modelo é muito sensível a perturbações, não possibilitando a troca do modelo $k - \varepsilon$ pelo $k - \omega$ para todo o domínio. Desta forma o modelo SST utiliza a interação das duas equações de transporte, através de uma função de mistura multiplicada no modelo $k - \varepsilon$, adicionando ao modelo $k - \omega$ também multiplicado por uma função de mistura, cujo valor desta função seja unitário em sua região logarítmica e gradativamente torne-se nula fora da mesma (Cunha, 2011). Assim o método SST é equacionado através da equação da energia cinética turbulenta (k) conforme a Eq. (4), e a equação da taxa de dissipação de energia cinética turbulenta (ω), segundo a Eq. (8). A formulação completa para o modelo SST é apresentada pelo conjunto de equações a partir da Eq. (4) até a Eq. (12) (Menter, 2003).

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial v_i k}{\partial x_i} = \frac{\tilde{P}_k}{\rho} - \beta^* \omega k + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (4)$$

$$\tilde{P}_k = \min(P_k 10\varepsilon) \quad (5)$$

$$\varepsilon = \beta^* \omega k \quad (6)$$

$$P_k = \mu_t \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \left[\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right] \quad (7)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial v_i \omega}{\partial x_i} = \alpha S^2 - \beta^* \omega^2 + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (8)$$

onde:

- v_i : Componente de velocidade;
- ρ : Massa específica;
- μ : Viscosidade molecular;
- μ_t : Viscosidade turbulenta;
- $\tilde{P}_k$: Termo limitador para evitar acúmulo de turbulência em regiões de estagnação;
- $\beta^* = 0.00$ *: é a função unitária e que se torna zero ao afastar da parede.

Variáveis constantes que pertencem aos modelos $k - \varepsilon$ e $k - \omega$:

- $\alpha_1 = 5/9$; $\beta_1 = 3/40$; $\sigma_\omega = 0.5$; $\sigma_{\omega^2} = 0.856$; $\beta_2 = 0.0828$; $\alpha_2 = 0.44$

A viscosidade turbulenta é calculada, conforme a Eq. (9):

$$\mu_t = \rho \frac{\alpha_1 k}{\max \left[\alpha_1 \omega (S_{ij} S_{ij})^{1/2} F_2 \right]} \quad (9)$$

sendo:

- $(S_{ij} S_{ij})^{1/2}$: uma medida do tensor taxa de deformação.

A função F_1 tem valor unitário em sua região logarítmica e gradativamente torna-se nula fora da mesma:

(10)

$$F_1 = \tanh \left[\left[\min \left[\max \left[\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}; \frac{500v}{y^2 \omega} \right]; \frac{4\rho \sigma_{\omega^2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right]^4 \right]$$

$$CD_{k\omega} = \max \left[2\rho \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-20} \right] \quad (11)$$

$$F_2 = \left[\tanh \left[\max \left[\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}; \frac{500v}{y^2 \omega} \right] \right]^2 \right] \quad (12)$$

onde:

- F_2 : é a combinação das funções na camada limite Eq. (11);
- y : Distancia entre a superfície e a parede.

3.2 Análise Numérica

Utilizando o programa ANSYS versão 14, com o módulo de análise fluidodinâmica computacional CFX, é possível executar a resolução e convergências das equações diferenciais de transporte através da análise de volumes finitos. A análise numérica compreendendo as três etapas básicas (pré-processamento, solução e pós-processamento) é realizada considerando as hipóteses básicas:

- Fluido newtoniano e incompressível;
- Fluido em análise possui somente uma fase;
- Escoamento em regime laminar ou turbulento;
- Sistema isotérmico.

Para efeito de validação de resultados, foi realizada uma análise numérica de um exemplo apresentados na norma NBR 6123 (1988) para obtenção dos coeficientes de pressão para uma cúpula esférica fechada com relação f/d de ¼, com 60 cm de diâmetro na base e 15 cm de altura máxima no centro. As condições de contorno utilizadas para a simulação do ensaio no túnel de vento foram: velocidade do vento (20 m/s), regime laminar, propriedades do ar conforme a Tabela 2. A similaridade entre o resultado obtido por meio da análise numérica e as linhas isobáricas apresentadas pela NBR 6123(1988) pode ser verificada na Fig. 8. Assim, é possível estabelecer uma comparação entre as simulações numéricas e os ensaios laboratoriais representados por este exemplo da norma, e extrapolados para as cascas de formas livres.

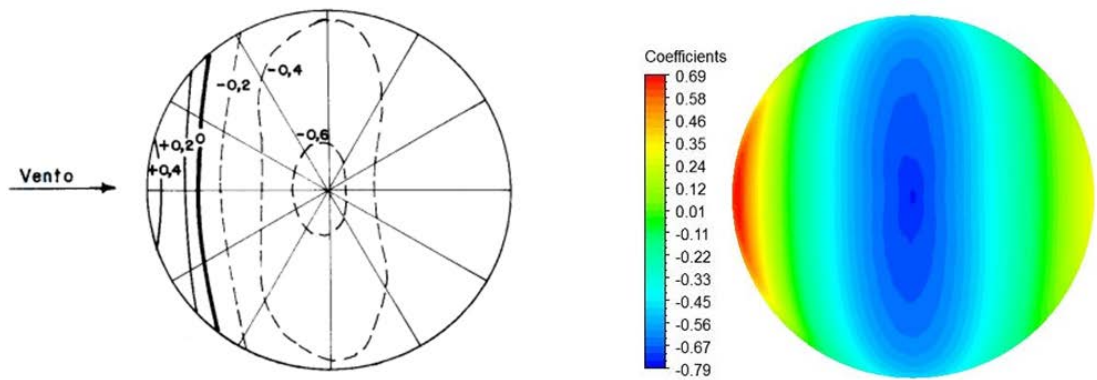


Figura 8. Coeficientes de pressão para cúpula esférica ($f/d = 1/4$): NBR 6123 (1988) e ANSYS - CFX

3.2.1 Configuração da Análise Numérica

Inicialmente o modelo CAD da casca de forma livre pentagonal criado por Ferreira (2013) foi exportado para o módulo *Design Modeler* integrante do programa ANSYS, sendo esta uma ferramenta de edição CAD. Em seguida foi gerado o espaço dimensional da câmara de ensaio do túnel de vento, respeitando todas as características como os posicionamentos do modelo na área de ensaio, aberturas e incidências do vento. Desta forma foi criado o domínio que é percorrido pelo fluido (vento) tendo a casca como objeto de obstrução e as dimensões do túnel de vento como limitação.

Após a delimitação do domínio, é necessário dividi-lo em elementos finitos, fazendo a discretização da malha. Utilizando o módulo *Meshing* do ANSYS, foi criada a malha utilizando elementos tetraédricos conforme observada na Fig. 9, que proporciona uma solução automatizada, com capacidade de adição de controles ou parametrizações para melhoramento em regiões críticas da análise, e também possui uma excelente capacidade de revelar qualquer tipo de distorção como variações de ângulos, comprimento de arestas, alongamento etc.

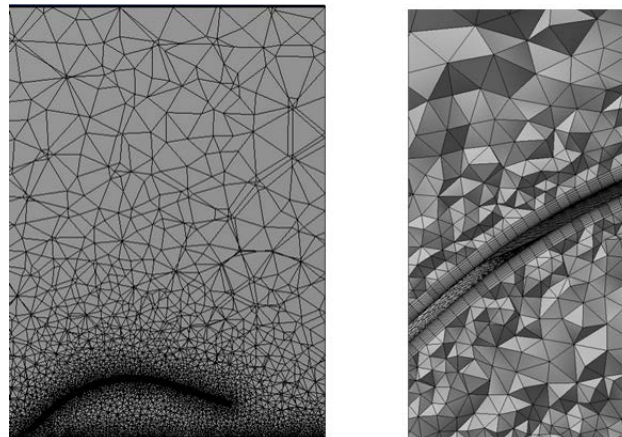


Figura 9. Malha de elementos tetraédricos e camadas limite

Alguns refinamentos foram inseridos na malha através de parâmetros do ANSYS para um melhor desempenho de solução em pontos críticos. Os refinamentos se repetiram em todas as análises numéricas, sendo os seguintes parâmetros:

- *Inflation*: permite a criação da camada limite e suas configurações como, espessura inicial e final da camada limite, numero de camadas, acréscimo de crescimento da camada limite. Este controle foi inserido nas paredes laterais e piso do túnel de vento e

em toda casca pentagonal, devido estarem em contato com o fluido criando a camada limite;

- *Face Sizing*: controla o tamanho do elemento para um refinamento da malha em regiões críticas do domínio. Como o foco dos resultados são os coeficientes de pressão, o mesmo foi adicionado em toda casca pentagonal e também no piso do túnel de vento, pois o mesmo exerce uma determinada influência no escoamento.

As configurações finais da malha para todas as análises são apresentadas pela Tabela 1.

Tabela 1. Parametrização Final da Malha

Solicitação	Configuração Adotada	
Tipo de elemento	Tetraédrico	
Espessura da camada limite	0,005	[m]
Espessura da primeira camada	0,000018	[m]
Numero de camadas	10	
Tamanho máximo do elemento	0,005	[m]
Numero de elementos no domínio	3.000.000	

Na sequência foram inseridas todas as condições de controle, através do módulo CFX-Pre do ANSYS, para todas as análises tanto em regime laminar como em regime turbulento. A Tabela 2 apresenta as propriedades físicas do ar que foram adicionadas em todas as análises. Estas propriedades são iguais às do ar do túnel de vento na data de realização dos ensaios.

Tabela 2. Propriedades Físicas do Ar

Propriedade	Sigla	Valor	Unidade
Temperatura	T	25	°C
Massa Específica	ρ	1,184	kg/m ³
Viscosidade Dinâmica	μ	1,85	(N·s/m ²) 10 ⁻⁵
Viscosidade Cinemática	ν	1,6	(m ² /s) 10 ⁻⁵
Condutividade Térmica	λ	0,024	W/(m·K)
Calor Específico	C	1012	J/(kg·K)

Para módulo Setup do ANSYS foi utilizado o método SST, pois todas as simulações foram executadas em estado transiente, mesmo em regime laminar, devido ao tempo de estabilização do escoamento. Como se trata de uma análise não linear, o processamento executa uma interação de convergência entre as equações que governam o domínio de

momento e de conservação de massa, cujo residual de convergência entre o máximo e o mínimo do RMS (*Root Means Square*) destas equações foi configurada para 10^{-4} .

A velocidade de entrada do vento foi de em 20 m/s, devido à limitação de velocidade do túnel de vento; com a pressão estática dentro da câmara de deste no valor de 1 atm para o regime de fluxo laminar. Todas as partes do domínio foram identificadas e definidas, conforme a Fig. 10.

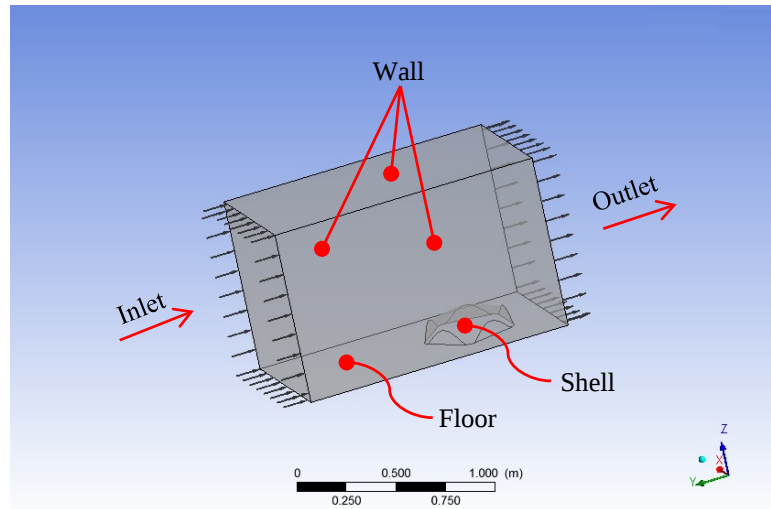


Figura 10. Identificação das partes do domínio

A Tabela 3 apresenta as configurações de controle dos ensaios para regime de fluxo laminar.

Tabela 3. Condições de Contorno das Análises em Regime Laminar

Solicitações	Configuração adotada
Identificação de partes do domínio	Inlet / Outlet / Floor / Shell / Wall
Modelo de Turbulência	Shear Stress Transport - SST
Controle de Convergência	Min. coef. loops = 1 / Max. coef. loops = 10
Critério de Convergência	Residual type = RMS / Residual target = 1,0 E-4
Tipo de Análise	Transient - Time duration 5,0 s - Time steps 0,001 s
Fluido do domínio	Air at 25° C @
Pressão de referência	1 atm
Inicialização	Cartesian velocity components: u=0; v=20 m/s; w=0 / Relative pressure = 0. Turbulence = medium intensity: 5%
Controle de Saída	Frequency: time interval = 2 s
Função das Paredes	Automatic

Para as análises em regime turbulento foi inserido o perfil de velocidade (Eq. 1) na entrada do domínio (Inlet) através da variável Vel_{Inlet} e para a intensidade da turbulência (Eq. 2) foi inserida na configuração através da variável $IntensTurb$. A Tabela 4 apresenta as configurações das análises para o regime turbulento.

Tabela 4. Condições de Contorno das Análises em Regime Turbulento

Solicitações	Configuração adotada
Identificação de partes do	Inlet / Outlet / Floor / Shell / Wall
Modelo de Turbulência	Shear Stress Transport - SST
Controle de Convergência	Min. coef. loops = 1 / Max. coef. loops = 10
Critério de Convergência	Residual type = RMS / Residual target = 1,0 E-4
Tipo de Analise	Transient - Time duration 5.0 s - Time steps 0,001 s
Fluido do domínio	Air at 25° C @
Pressão de referencia	1 atm
Inicialização	Cartesian velocity components: $u=0$; $v= Vel_{Inlet}$; $w=0$ /
Turbulência	Intensity and length scale
Fracional de Identidade	Value = $IntensTurb$
Controle de Saída	Frequency: time interval = 2 s
Expressões	$Vel_{Inlet} = U_{ref} * (z/z_{ref})^{\alpha}$
Função da Parede	Automatic

A próxima etapa consiste praticamente em processamento para execução dos cálculos, sendo o módulo *Solution* do ANSYS o responsável por este trabalho, executando a interação de convergência das equações que governam o domínio. Em seguida, é possível visualizar os resultados através do módulo *Results* do ANSYS, através de linhas de fluxo, vetores, entre outros. Para este trabalho foram utilizadas as linhas de contorno que representam os coeficientes de pressão.

4 RESULTADOS

Os resultados são visualizados e comparados com gráficos de linhas em escala de cores, e os coeficientes de pressão apresentados em figuras das superfícies da casca de forma livre de planta pentagonal através de linhas isobáricas para a análise numérica e os ensaios experimentais, que podem ser verificados através da Fig.11 a Fig. 21.

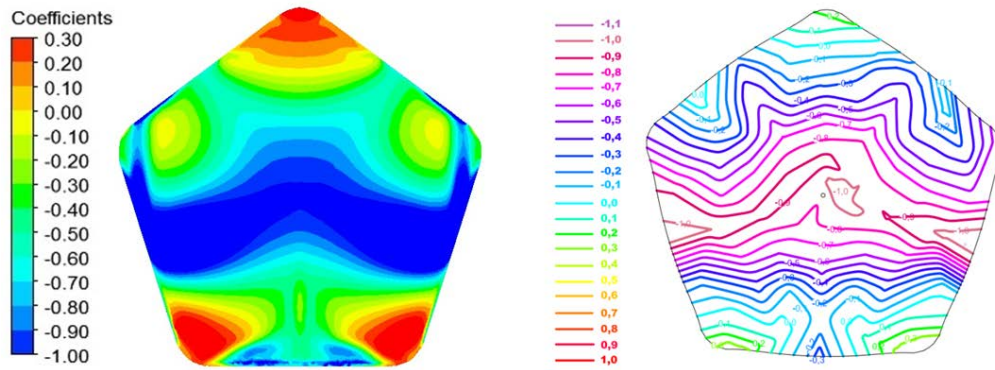


Figure 11. Coeficientes de pressão externos em modelo totalmente fechado, com barlavento a 0° , em regime laminar

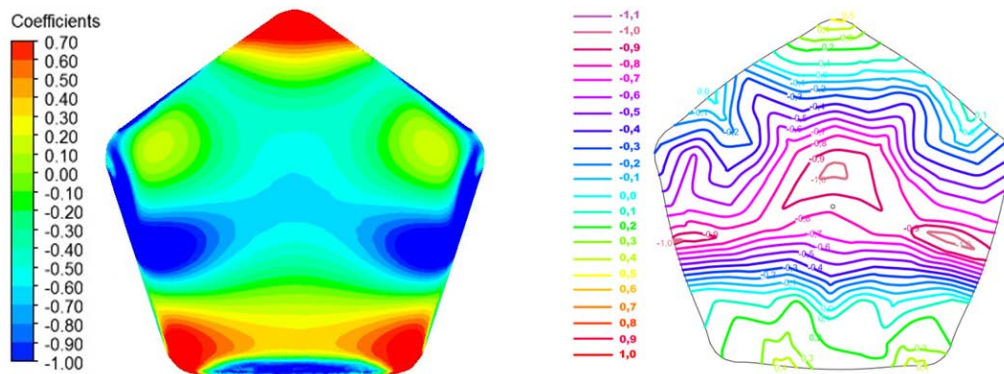


Figure 12. Coeficientes de pressão externos em modelo totalmente fechado, com barlavento a 0° , em regime turbulento

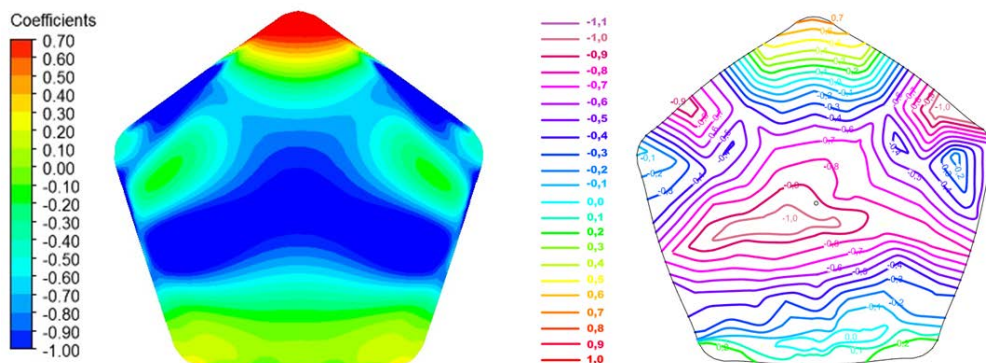


Figure 13. Coeficientes de pressão externos em modelo totalmente fechado, com barlavento a 180° , em regime laminar

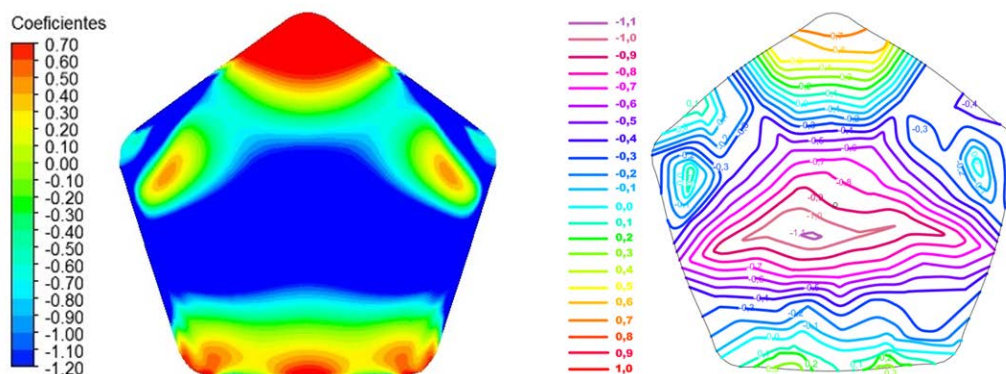


Figure 14. Coeficientes de pressão externos em modelo totalmente fechado, com barlavento a 180°, em regime turbulento

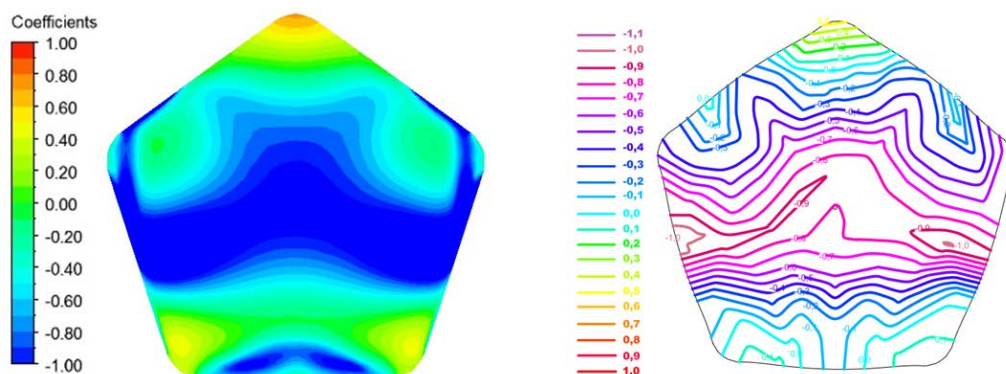


Figure 15. Coeficientes de pressão externos em modelo com abertura dominante e barlavento a 0°, em regime laminar

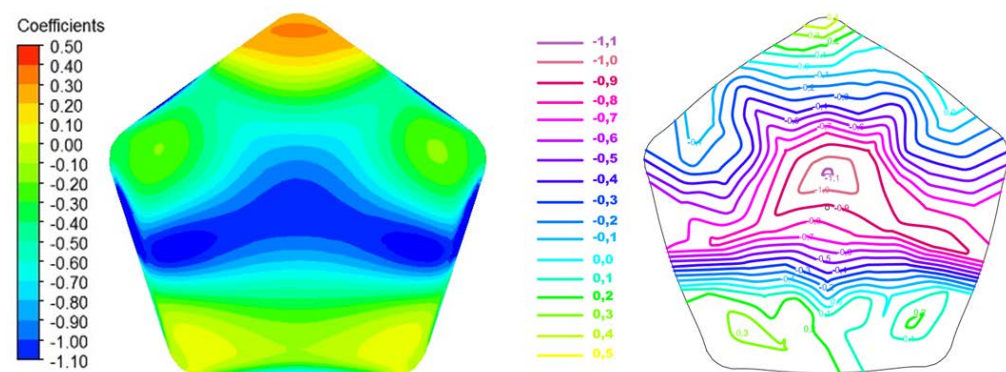


Figure 16. Coeficientes de pressão externos em modelo com abertura dominante e barlavento a 0°, em regime turbulento

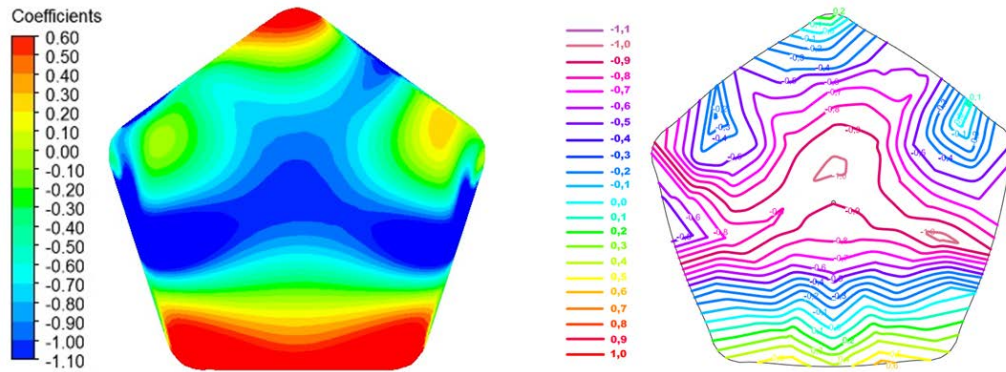


Figure 17. Coeficientes de pressão externos em modelo com aberturas dominantes a 0° e 225°, e barlavento a 0° em regime laminar.

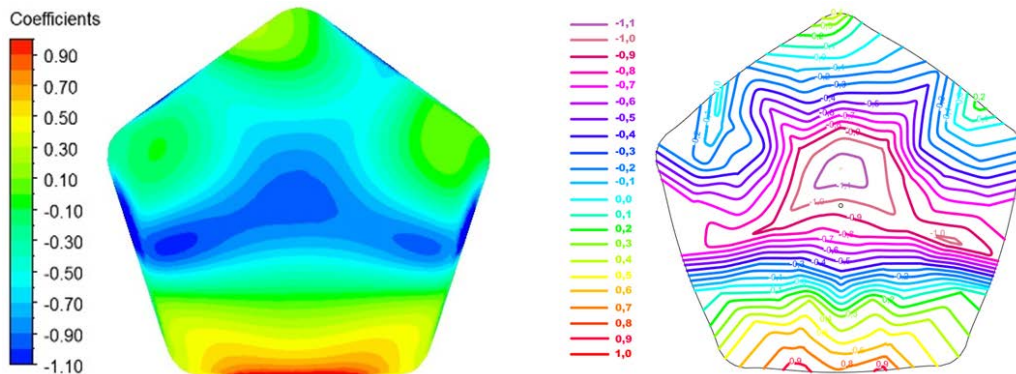


Figure 18. Coeficientes de pressão externos em modelo com aberturas dominantes a 0° e 225°, e barlavento a 0° em regime turbulento.

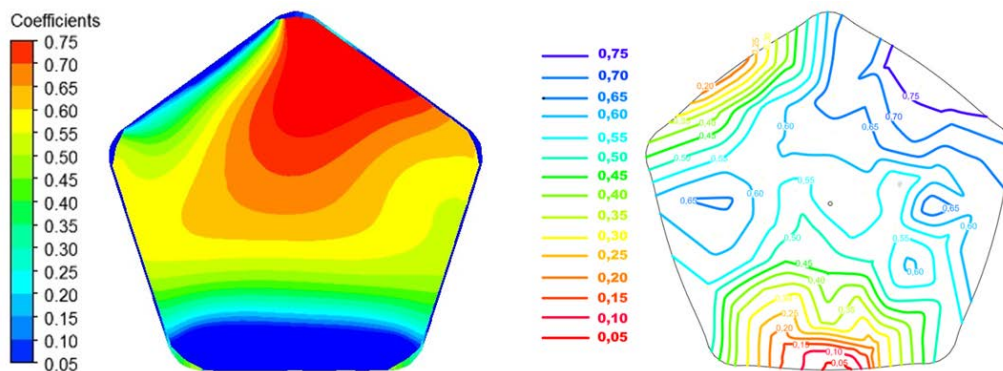


Figure 19. Coeficientes de pressão internos em modelo com aberturas dominantes a 0° e 225°, e barlavento a 0° em regime turbulento.

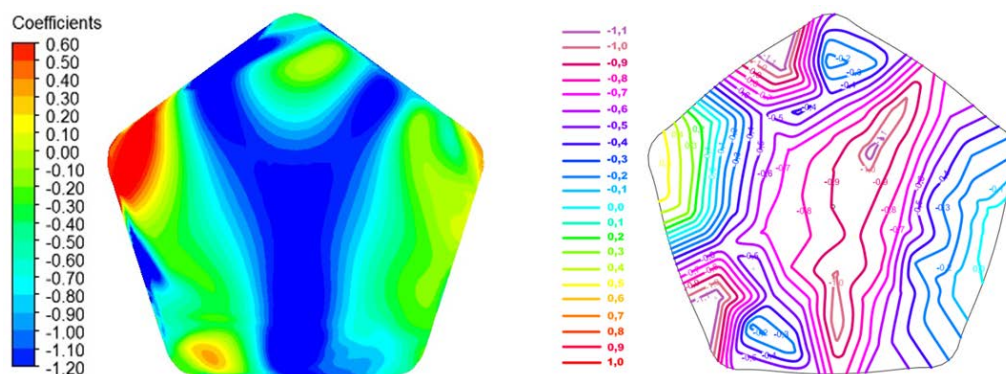


Figure 20. Coeficientes de pressão internos em modelo com aberturas dominantes a 0° e 225° , e barlavento a 90° em regime laminar.

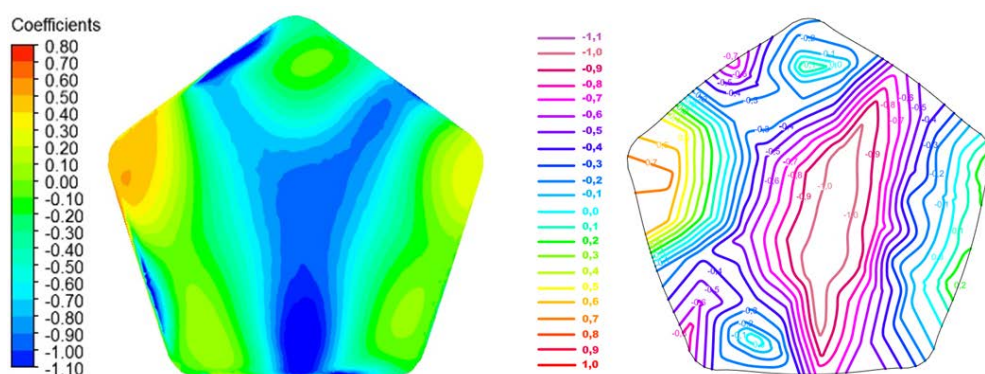


Figure 21. Coeficientes de pressão internos em modelo com aberturas dominantes a 0° e 225° , e barlavento a 90° em regime turbulento.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho são conclusivos em relação a uma velocidade máxima do vento de 20 m/s, pois é a limitação física do túnel de vento LaCAF, mas com suficiente estabilidade para obtenção dos resultados dos coeficientes de pressão. Observou-se que em todos os ensaios no túnel de vento e em todos os pontos do modelo de casca de forma livre de planta pentagonal apoiada nos vértices, os coeficientes de pressão se mantiveram estáveis a partir da velocidade de 430 rpm do ventilador do túnel de vento. Sendo assim, é afirmativo dizer que se o escoamento tiver uma velocidade alta o mesmo será controlado pelos efeitos de inércia, deixando as linhas de corrente do fluxo paralelas ao corpo imerso e mantendo a camada limite.

Alguns fatores podem ter contribuído para uma pequena distorção dos valores obtidos dos coeficientes de pressão coletados, um deles é a rugosidade dos modelos. Os modelos não possuem uma superfície perfeita e a rugosidade tem uma influência na obtenção dos valores, podendo causar o desprendimento da camada limite que esta adjacente ao corpo. Outro fator a ser considerado são as mangueiras de coleta de dados instrumentadas em cada modelo, que mesmo estando bem fixadas podem interferir como elementos perturbadores de fluxo perto do corpo analisado. Os valores de coeficientes de pressão mais expressivos coletados foram:

- O maior valor de sobrepressão foi de +0,82. Este é um coeficiente de pressão externo do ensaio no túnel de vento, com estrutura possuindo duas aberturas predominantes e barlavento a 0° no regime turbulento. Este valor está localizado bem próximo a face de barlavento (Fig. 18). Deste modo é possível dizer que este valor pode ser tratado como uma sobrepressão externa com compressão da estrutura;
- O maior valor de sucção encontrado foi -1,2. Este é um coeficiente de pressão externo do ensaio no túnel de vento com uma abertura e barlavento a 0° em regime turbulento (Fig. 16). Este valor está localizado em um dos pontos mais altos da estrutura, deste modo é possível afirmar que trata-se de uma sucção externa, que ocasiona o efeito de levantamento da mesma.

É possível verificar uma proximidade entre os resultados obtidos, tanto experimentais como das análises numéricas. Alguns casos se aproximam mais que outros, sendo que a variação entre as médias das análises está entre 0,1% e 19,8%. Esta variação foi calculada fazendo a média aritmética simples entre todos os valores de cada análise e dividindo a média da análise numérica pela média experimental, obtendo a variação em porcentagem entre elas.

Assim é possível concluir que a análise numérica possui uma grande confiabilidade para o estudo da ação do vento neste tipo de estrutura, permitindo assim estudar mais variações de ação do vento com diferentes tipos de aberturas não necessitando a construção física de modelos complexos para ensaios em túnel de vento.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar o meu agradecimento para a equipe de trabalho composta pelo orientador Prof. Dr. Isaias Vizotto, os meus colegas Prof. Dr. Antônio Mário Ferreira, Me. Sebastián Moreno Cardenas, Prof^a. Dr.^a Lucila Chebel Labaki e Dr. Edson Matsumoto.

REFERENCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR-6123, 1998. *Forças Devidas ao Vento em Edificações*. Rio de Janeiro.

Blessmann, J., 2011. *Aerodinâmica das Construções*. 3ed. UFRGS, Porto Alegre.

Brandão, J. H., 2005. *Análise experimental e numérica de cascas de concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras*. Tese (Doutorado), Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Cunha, A. C., Pinheiro, L. A., 2011. Simulação da Hidrodinâmica e Dispersão de Poluentes com Monitoramento Virtual no Rio Matapi-AP. *REA Revista de Estudos Ambientais*, Vol.13, n. 2, pp. 18-32.

Ferreira, A. M., 2013. *Análise de Estruturas em Cascas de Formas Livres sob a Ação do Vento*. Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas.

Irwin, P., Denoon, R., & Scott, D., 2013. *Wind Tunnel Testing of High-Rise Buildings*. Illinois Institute of Technology, Routledge, New York.

Matsumoto, E., 2008. *Calibração do túnel de vento de camada limite atmosférica e ensaios de aberturas em edificações utilizando modelos reduzidos*. Projeto de Pesquisa. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas.

Menter, F. R., 1994. *Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications*. *AIAA Journal*, vol. 30, pp. 1657-1659.

Menter, F. R., Kuntz, M., & Langtry, R., 2003. *Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model*. Software Development Department, ANSYS – CFX, 83714 Otterfing, Germany. Turbulence, Heat and Mass Transfer.

Munson, B. R., Young, D. F., & Okiishi, T. H., 2004. *Fundamentos da mecânica dos fluidos*. Blucher.

Vizotto, I., 1993. *Geração computacional de formas livres de estruturas em casca*. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.