

ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DE AGULHAS NO PERFIL DE VELOCIDADE DE UM ESCOAMENTO DE UM TÚNEL DE VENTO

Luiz Fernando R. Ledo^{1*}, Sérgio de M. Hanriot¹ e Cristiana B. Maia¹

1: Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Av. Dom José Gaspar, 500 – Coração Eucarístico, 30535-901, Belo Horizonte, Minas Gerais,
Brasil
e-mail: lribeiroledo@yahoo.com.br{hanriot,cristiana}@pucminas.br

Palavras-chave: CFX, ANSYS, Túnel de Vento, Agulhas, Camada Limite Atmosférica.

Resumo. *Um modelo numérico foi desenvolvido para analisar a influência de agulhas no escoamento da seção de testes de um túnel de vento de camada limite atmosférica. As dimensões do túnel de vento em estudo correspondem às do equipamento Plint & Partners LDD Wokingham Berkshire England. A seção de testes é quadrada com aresta de 460 mm e comprimento de 1200 mm. Para melhor simular o escoamento de uma camada limite atmosférica, foi acoplado à seção de testes um canal com largura interna de 410 mm e comprimento de 1200 mm. As agulhas consistem de placas triangulares dispostas na entrada da seção de testes, sendo cada agulha constituída de duas chapas recortadas e dobradas. O estudo foi realizado utilizando o software comercial ANSYS – CFX 14.5 para simular numericamente o escoamento turbulento e, regime permanente no interior do túnel de vento sem e com as agulhas. Observou-se que a inserção de agulhas afeta significativamente o perfil de velocidade no decorrer do túnel. A espessura da camada limite para o escoamento com agulhas foi maior que para o escoamento sem as agulhas. No entanto, para que o escoamento seja mais uniforme em uma dada seção, necessário o uso de outros dispositivos.*

1. INTRODUÇÃO

A simulação de escoamentos atmosféricos em túnel de vento é utilizada para investigação de efeitos topográficos e de geração de turbulência pela superfície. A operação em túneis de vento depende das suas dimensões, das dimensões do ambiente simulado, da velocidade do escoamento e das propriedades turbulentas, bem como das características dos instrumentos de medição utilizados.

Devido ao uso em grande escala de simulações de modelos reduzidos em túneis de vento, pode-se considerar que testes em escalas bem conduzidos podem ser aplicados efetivamente em modelos de escala real. Segundo Barlow et. al [1] existem dois tipos básicos de túneis de vento: de circuito aberto e de circuito fechado. No primeiro caso, o ar que escoar é proveniente do ambiente externo e no segundo tipo, o ar que escoar é sempre o mesmo.

Na maioria dos túneis de vento, a seção de testes não é extensa o suficiente para o estudo do desenvolvimento completo da camada limite atmosférica. Devido à necessidade de uma longa

seção de testes e à dificuldade de se construir um túnel com as condições desejadas, são utilizados dispositivos para auxiliar a obter as condições desejadas. As agulhas são dispositivos construídos por chapas de formato triangular ou tetraédrico, dobradas e posicionadas na entrada da seção de testes com o intuito de forçar o escoamento a ter comportamento similar aos ventos naturais. Os canais são dispositivos utilizados para prolongar o comprimento da seção de testes, aumentando a área estudada e facilitando a obtenção de uma camada limite atmosférica completamente desenvolvida.

Encontram-se na literatura inúmeros trabalhos utilizando túneis de vento de camada limite atmosférica. Loredou-Souza e outros [2] apresentaram estudos de técnicas de simulação de camada limite atmosférica em túneis de vento para qualquer velocidade do vento, controlando a tensão de cisalhamento e a velocidade de corte pela rugosidade do terreno. Irwin [3] apresentou o estudo das equações para construção de agulhas usadas para o uso em simulações de camada limite planetária. Essas agulhas são utilizadas em combinação com rugosidade no solo por produzir turbulência em larga escala com a intensidade compatível com dados da camada limite planetária. Counihan [4] apresentou uma avaliação experimental de vários tipos de geradores de turbulência levando à adoção de um sistema de cunha elíptica e de uma barreira acastelada. É necessário um comprimento da seção de testes de quatro a cinco vezes a altura da camada limite. Barbosa e outros [5] propuseram uma metodologia para a produção de camada limite de espessura em túneis de vento curtos utilizando telas, geradores de cunha elíptica e geradores de haste cilíndrica.

A simulação de escoamentos utilizando técnicas de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, do inglês Computational Fluid Dynamics) também é um tema bastante explorado na literatura. Blocken e outros [6] apresentaram uma discussão da importância da precisão encontrada nos estudos de CFD, que pode ser seriamente comprometida quando a função de rugosidade da parede é alterada. Os problemas geralmente se manifestam como gradientes involuntários na velocidade média e nos perfis de turbulência, sendo responsabilizados por certas discrepâncias encontradas em algumas simulações de CFD. No trabalho, os autores discutem em detalhes o problema e as suas consequências negativas com sugestões de possíveis melhoras para as simulações.

No presente trabalho, o objetivo principal é analisar numericamente a influência das agulhas na entrada da seção de testes, comparando os resultados com os resultados de um escoamento na seção de testes sem as agulhas. Outros pesquisadores já apresentaram estudos sobre o atual túnel estudado. Roballo e outros [7] apresentaram um estudo experimental do escoamento atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara através de uma simulação em túnel de vento, Pires e outros [8] apresentaram a medição do escoamento atmosférico em um túnel de vento utilizando técnicas de anemômetro de fio quente e as técnicas de velocimetria de imagem de partículas (do inglês Particle Image Velocimetry, PIV).

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

2.1 Equações Governantes do Problema

As equações que governam o problema são as equações de conservação da massa e da

quantidade de movimento linear, assim como as equações de transporte das grandezas turbulentas. A equação (1) apresenta a forma diferencial do princípio de conservação da massa.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Onde ρ é massa específica do fluido, t é a coordenada temporal, x , y e z representam as coordenadas espaciais cartesianas de um sistema tridimensional e u , v e w são, respectivamente, as componentes de velocidade nas direções x , y e z .

As equações (2), (3) e (4) representam as equações de Navier-Stokes, válidas para escoamento incompressível de fluidos Newtonianos.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + S^x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + S^y \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + S^z \quad (4)$$

Onde μ é a viscosidade dinâmica, S^x , S^y e S^z são os termos fonte nas direções dos eixos x , y e z , p é a pressão e g a aceleração da gravidade [9].

2.2 Modelo de Turbulência

Por não ser analiticamente possível a solução de escoamentos em regime turbulento, foi utilizada a modelagem numérica do escoamento com o uso de modelos de turbulência.

O modelo $k-\varepsilon$ pertence à classe de modelos de duas equações, apresentando boa adequação em termos de exatidão e robustez para simulações de finalidade geral. Entretanto, o modelo $k-\varepsilon$ não é adequado para escoamento com separação de camada limite, escoamento com mudanças repentinas na taxa de deformação média e escoamentos sobre superfícies curvas. Outro modelo que adiciona duas equações de transporte às equações governantes é o modelo $k-\omega$, tornando-se a alternativa mais proeminente, utilizando a frequência de turbulência ω em vez da dissipação da energia cinética turbulenta ε [10].

Devido ao desempenho insatisfatório para camadas limite com gradientes de pressão adverso do modelo $k-\varepsilon$, foi sugerido um modelo híbrido que utilizasse o modelo $k-\varepsilon$ na região afastada e o modelo $k-\omega$ na região próxima da parede. O modelo $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport) foi projetado para prover previsões altamente exatas de início e quantidade de separação de escoamento sob gradientes de pressão adversos através da inclusão de efeitos de transporte na formulação de viscosidade turbulenta. Ele difere do $k-\omega$ padrão por levar em consideração o transporte de tensões de cisalhamento turbulentas. As equações de transporte para o modelo $k-\omega$ SST, usado no presente trabalho, são [10]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho k v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho k w)}{\partial z} = \frac{\mu_t}{\sigma_k} \left(\frac{\partial^2 k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 k}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 k}{\partial z^2} \right) + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho k \omega \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \omega v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega w)}{\partial z} \\ &= \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega,1}} \right) \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right) + \gamma_2 \left(2\rho S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) - \beta_2 \rho \omega^2 + 2 \frac{\rho}{\sigma_{\omega,2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_k} \frac{\partial \omega}{\partial x_k} \quad (7) \end{aligned}$$

A equação 6 representa a equação de transporte para ε e a equação 7 a equação de transporte para ω . O primeiro termo das duas equações representam a taxa de variação de k ou ω , os três termos seguintes representam o transporte de k ou ω por convecção, o quinto termo representa o transporte de k ou ω por difusão, o sexto termo representa a taxa de produção de k ou ω , o sétimo termo representa a taxa de distribuição de k ou ω e por fim, no caso da equação (7) o último termo representa a difusão cruzada, originada durante a transformação $\varepsilon = k\omega$. As constantes do modelo k - ω utilizadas foram:

$\sigma_k = 1.0$, $\sigma_{\omega,1} = 2.0$, $\sigma_{\omega,2} = 1.17$, $\gamma_2 = 0.44$ e $\beta_2 = 0.083$.

3. METODOLOGIA NUMÉRICA

Para a solução numérica das equações governantes do problema, foi utilizado o software comercial ANSYS/CFX 14.5.

Para definição do problema e das condições de contorno, foram utilizados dados experimentais provenientes do túnel de vento *Plint & Partners LDD Wokingham Berkshing England* (Figura 1). O túnel de vento possui as dimensões mostradas na Figura 1, sendo a primeira parte composta por uma seção de testes quadrada com arestas de 460mm e comprimento de 1200mm e a segunda parte, por um canal com altura de 460mm, largura de 410mm e comprimento total de 1200mm com a face superior aberta. A condição estudada corresponde a uma vazão de 0,33867 kg/s, obtida por dados experimentais encontrados na literatura [11], resultando em números de Reynolds na seção de testes da ordem de 10^4 .

Foram simuladas duas situações, sendo a primeira o escoamento no túnel vento sem as agulhas e a segunda o escoamento com três agulhas de placas triangulares na seção de testes com o objetivo de aumentar a turbulência e consequentemente a espessura da camada limite.

O modelo de turbulência utilizado foi o k - ω SST, o esquema de interpolação de advecção foi o de High Resolution (alta resolução) e o esquema de interpolação numérica de turbulência foi o de First Order (primeira ordem).

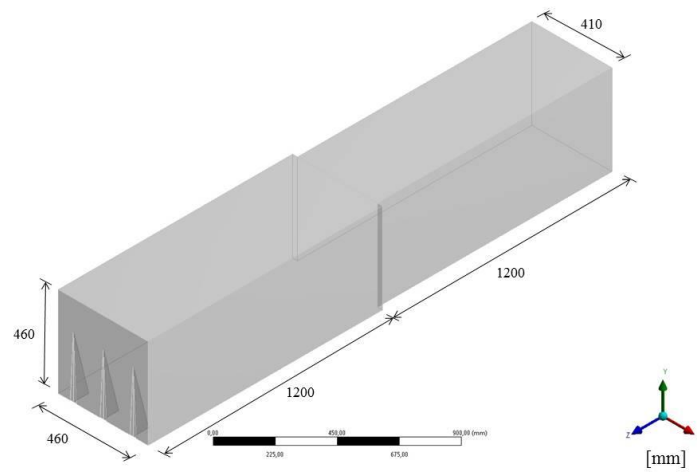


Figura 1: Domínio computacional e suas dimensões

Foram atribuídas as condições de contorno apresentadas na Tabela 1 e na Figura 2. Os valores foram obtidos de dados experimentais [11] para ensaios realizados no túnel de vento em estudo.

Domínio	Condição de Contorno
Entrada	Vazão Mássica (0,33867 kg/s)
Saída	Pressão Atmosférica (1 Atm)
Paredes	Não deslizamento e fronteira impermeável

Tabela 1. Condições de contorno impostas no domínio computacional

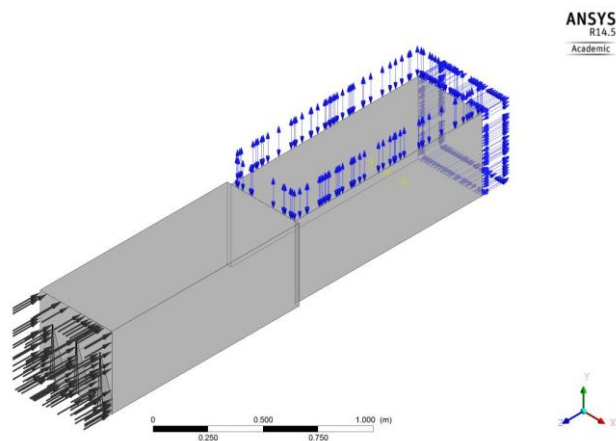


Figura 2: Condições de contorno impostas

No presente trabalho foi utilizado um computador com as seguintes configurações: 16GB

RAM, Windows 64 bits, processador Intel® Core™ i7 3.4GHz, 1TB HD. O trabalho foi realizado na plataforma Workbench do Ansys, na qual é possível a modelagem ou importação da geometria a ser trabalhada, geração de malha, introdução das condições de contorno, solução e visualização do pós-processamento.

As hipóteses aplicadas são:

- Ar como gás ideal;
- Escoamento em regime permanente;
- Temperatura ambiente de 299K;
- Pressão atmosférica de 101.325 Pa;
- Vazão mássica experimental como condição de entrada no sistema;
- *Opening* como condição de saída, o que permite a recirculação do fluido na saída;
- Não deslizamento na parede.

4. RESULTADOS

Foi realizada a simulação numérica do escoamento no interior do túnel de vento de camada limite atmosférica, sem agulhas e com três agulhas posicionadas na entrada da seção de testes. A vazão mássica utilizada foi de 0,33867 kg/s, de acordo com dados experimentais da literatura [11]. Foi realizado um teste de malhas, sendo monitorada a velocidade no ponto central do canal, identificado na Figura 3. A tabela 2 apresenta as características das malhas testadas e as velocidades obtidas para o ponto em cada situação.

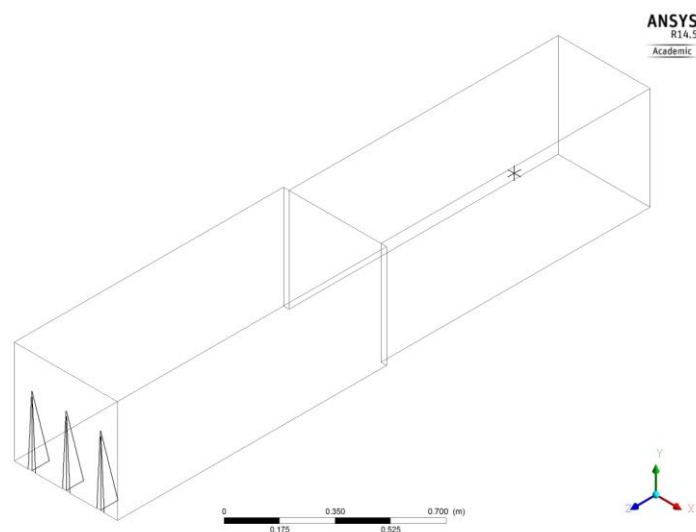


Figura 3: Ponto de medição para testes de malha

	Túnel sem Agulhas		Túnel com Agulhas	
	Nº de Nós	Velocidade	Nº de Nós	Velocidade
1	1.684.766	1,64596 m/s	1.645.659	1,60104 m/s
2	2.098.697	1,64674 m/s	1.983.790	1,59068 m/s
3	2.682.751	1,64616 m/s	2.519.155	1,58846 m/s
4	3.556.109	1,64579 m/s	3.402.467	1,58453 m/s

Tabela 2. Teste de malhas

A Figura 4 apresenta as linhas de corrente no interior do túnel de vento com as agulhas posicionadas na entrada da seção de testes. Pode-se observar que as agulhas não criaram zonas de recirculação no escoamento. Observa-se ainda que, como a face superior do canal é aberta, é gerada uma mudança de direção do escoamento nesta região, com saída de massa.

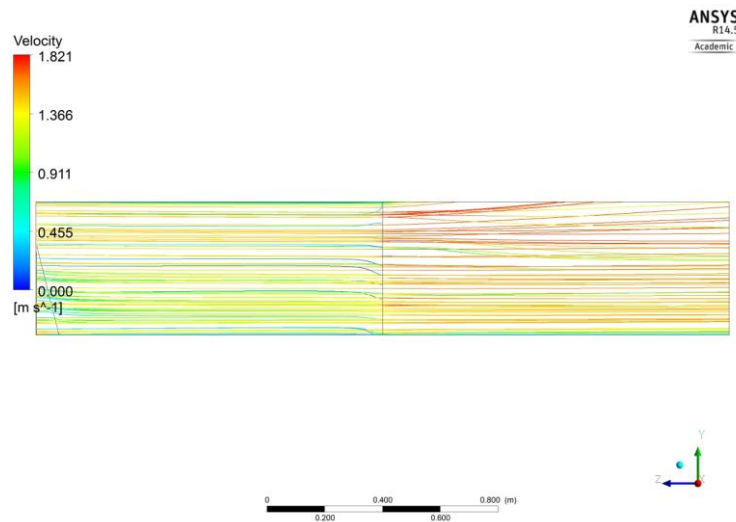


Figura 4: Linhas de corrente

A jusante das agulhas, foram criadas esteiras no escoamento, como pode ser observado na Figura 5, que ilustra a velocidade em um plano horizontal situado a 115 mm de altura em relação à superfície inferior. Observa-se que devido à perturbação causada pelas agulhas, a velocidade é reduzida exatamente a jusante das mesmas. Na região do canal, são obtidas maiores velocidades devido à redução da seção transversal do escoamento.

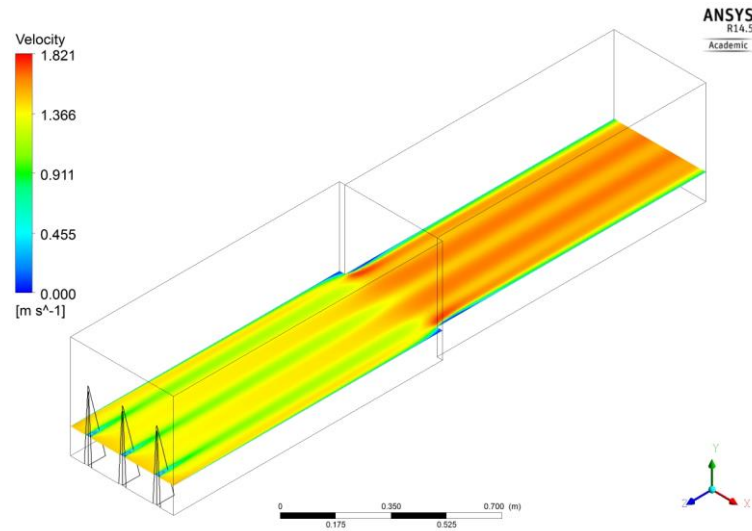


Figura 5: Esteiras no escoamento geradas pelas agulhas

Para se avaliar o comportamento da velocidade ao longo do túnel, foi plotado o perfil de velocidades em onze diferentes linhas, igualmente espaçadas, como mostrado na Figura 6.

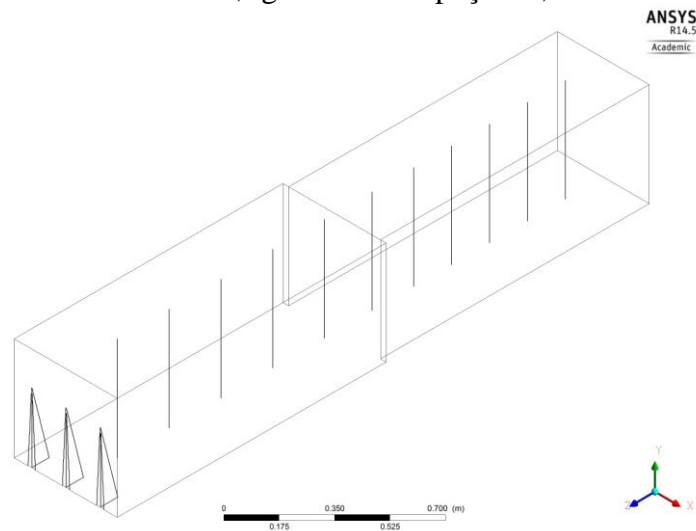


Figura 6: Linhas de medição

A Figura 7 apresenta os perfis de velocidades obtidos para o escoamento sem a presença das agulhas. No interior da seção de testes (Linhas 1 a 5), o perfil é simétrico e achatado, característico dos escoamentos turbulentos. A partir da linha 6, já no interior do canal, observa-se que não há mais simetria, uma vez que há a tendência de parte do ar de escoar pela parte superior do canal. Este comportamento pode ser visualizado também na Figura 8, que mostra a componente vertical da velocidade nas mesmas linhas. Até a linha 5, são obtidos baixos valores da velocidade v , que alcança valores mais altos a partir da linha 6.

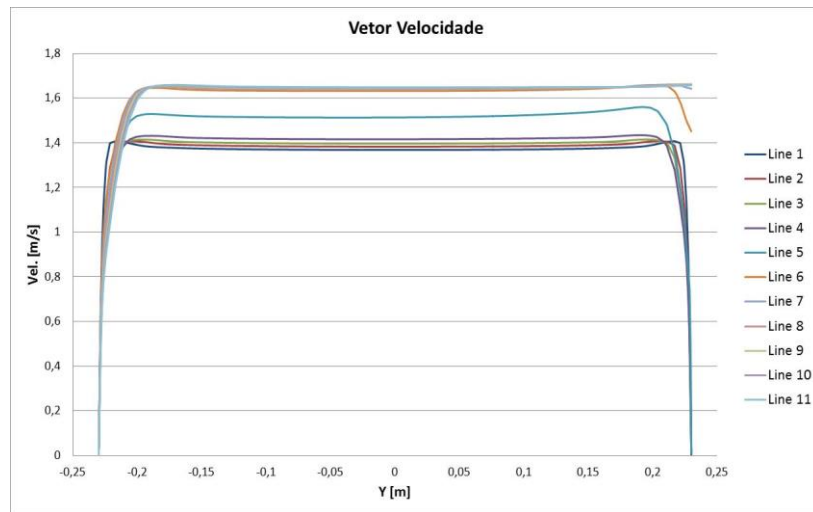


Figura 7: Perfil de velocidade sem as agulhas

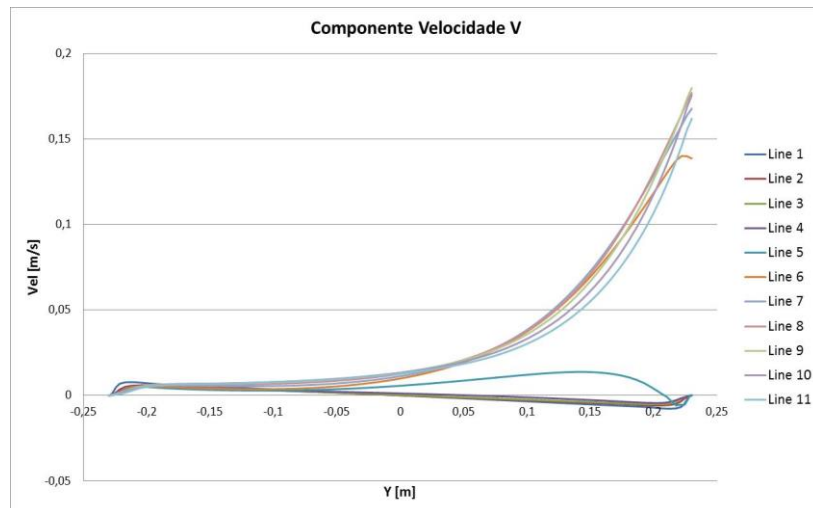


Figura 8: Perfil de Velocidade da componente v sem as agulhas

A Figura 9 apresenta os perfis de velocidade obtidos para o escoamento no interior do túnel com as agulhas posicionadas na entrada da seção de testes. Para cada uma das linhas, observa-se o crescimento da velocidade ao longo da direção vertical, indicando que as agulhas causam uma perturbação no escoamento. Na região não obstruída pelas agulhas, são obtidas maiores velocidades. À medida que o ar se afasta das agulhas, a perturbação se torna menor e maiores velocidades são obtidas em uma mesma altura. Na região do canal, o perfil de velocidades não varia significativamente para diferentes valores de z . A Figura 10 apresenta a componente vertical da velocidade para esta condição. Não são observadas diferenças significativas em relação aos perfis obtidos para o túnel de vento sem as agulhas.

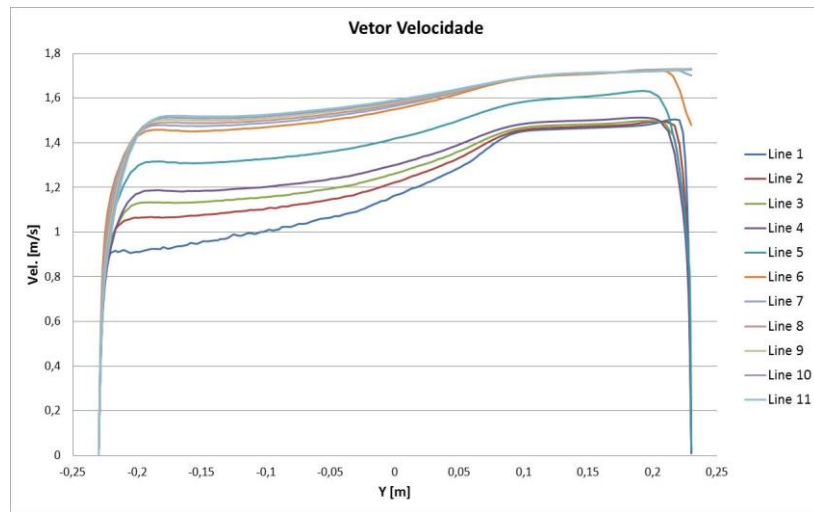


Figura 9: Perfil de velocidade com as agulhas

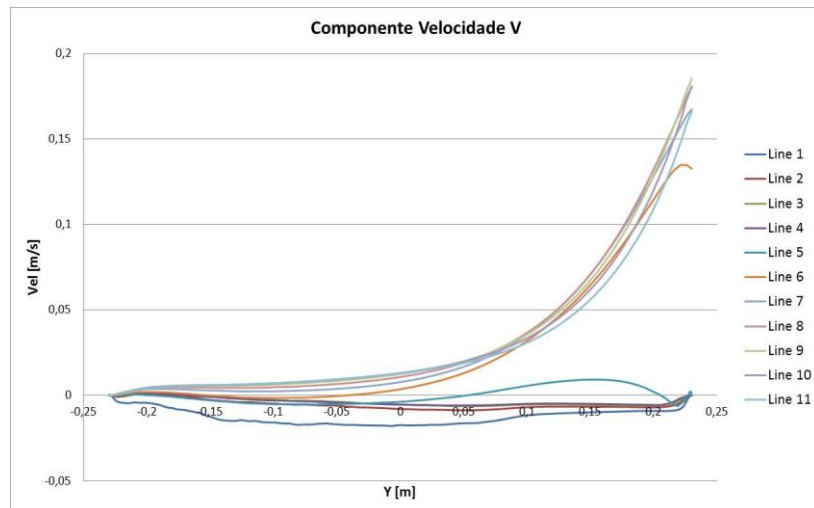


Figura 10: Perfil de Velocidade da componente v com as agulhas

O objetivo de se colocar agulhas na entrada da seção de testes é aumentar a espessura da camada limite quando comparada ao escoamento sem agulhas. A Figura 11 mostra o desenvolvimento da camada limite ao longo do túnel de vento sem agulhas e com agulhas. A espessura da camada limite foi definida como sendo o ponto no qual a velocidade do escoamento é igual a 99% da velocidade média no plano medido. Como mostrado na Figura 5 para o escoamento com as agulhas, há uma variação da velocidade na direção x , devido às esteiras causadas pelas agulhas. Por esta razão, foi avaliado o comportamento da camada limite em planos verticais xy posicionados no centro do túnel de vento e na metade da distância entre duas agulhas adjacentes. As linhas inferiores do gráfico mostram a camada limite no escoamento nestes planos para o túnel de vento sem as agulhas. Observa-se que a camada limite cresce a jusante do escoamento e que não há

diferenças significativas entre os resultados nos dois planos, como esperado. As linhas superiores mostram o desenvolvimento da camada limite no túnel de vento com as agulhas. Pode-se notar que houve de fato o aumento da espessura da camada limite com a inserção das agulhas. No entanto, observam-se diferenças significativas entre os dois planos. Em ambos os casos, há um grande crescimento da espessura da camada limite na seção de testes, quando comparada ao escoamento sem agulhas. Este comportamento pode ser explicado pela redução da velocidade a jusante das agulhas, como ilustrado nas Figuras 12 (plano central) e 13 (plano lateral). O ponto correspondente à linha 5 experimenta uma grande queda da espessura, por estar situado bem próximo à junção entre a seção de testes e o canal, sofrendo a influência da mudança de seção. O comportamento da camada limite é distinto no canal nos planos avaliados. No plano central, observa-se uma queda da espessura; enquanto no plano lateral, observa-se um aumento desta grandeza. As diferenças podem ser atribuídas às diferenças observadas na velocidade, causadas pela esteira formada a jusante das agulhas no plano central, como mostrado nas Figuras 12 e 13.

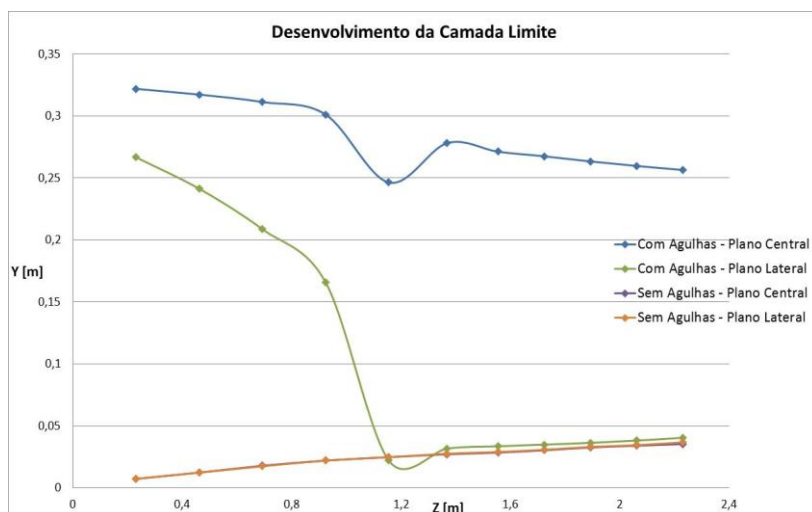


Figura 11: Desenvolvimento da camada limite com e sem agulhas

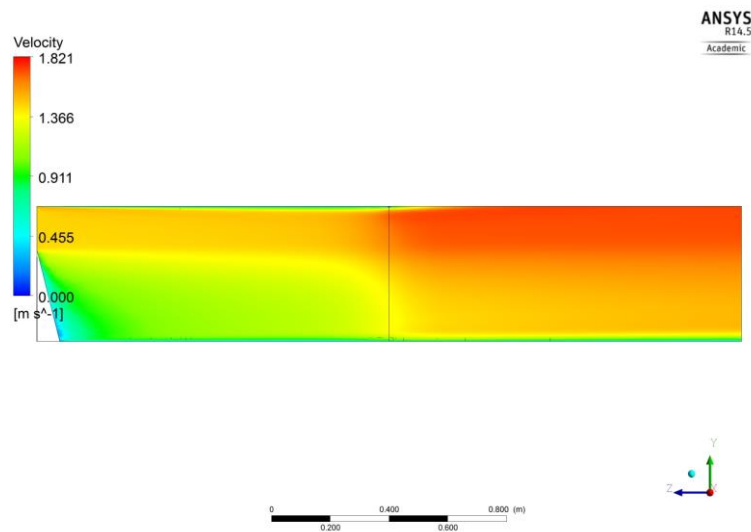


Figura 12: Plano de velocidade no centro do túnel

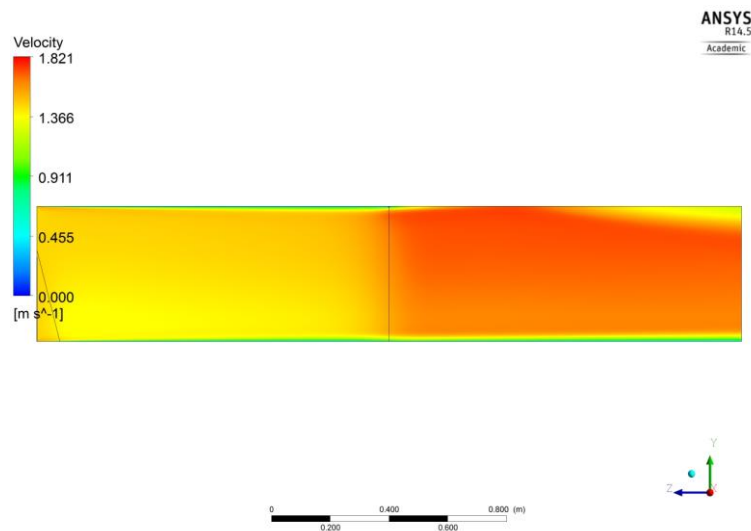


Figura 13: Plano de velocidade entre as duas agulhas

Pode-se concluir, portanto, que a presença das agulhas aumenta a espessura da camada limite quando se comparam os resultados para o túnel de vento com e sem agulhas. No entanto, somente a inserção das agulhas não é suficiente para garantir um escoamento uniforme, adequado à simulação de uma camada limite atmosférica. Foram observadas diferenças significativas do escoamento em planos verticais xy paralelos, sendo necessária ainda a uniformização do mesmo, com a inserção de outros dispositivos, como telas e tapetes.

5. CONCLUSÕES

Foi realizada a simulação numérica do escoamento em um túnel de vento de seção de testes curta do ITA, utilizando-se o software comercial Ansys CFX 14.5 com condições de contorno baseadas em resultados experimentais encontrados na literatura.

Observa-se que em ambas as simulações, a velocidade no canal é maior que a velocidade na seção de testes, mesmo o canal apresentando sua face superior aberta. Este fato ocorre devido à brusca redução da largura interna na transição da seção de testes para o canal.

Observa-se que as agulhas influenciam o escoamento até o final do canal, resultando em um escoamento não uniforme no decorrer do túnel, e consequentemente, espessuras de camada limite diferentes de acordo com a região de medição. Observou-se também que com as agulhas, o desenvolvimento da camada limite foi acelerado e a sua espessura apresentou maior dimensão que a camada limite do túnel sem as agulhas.

Devido à influência das agulhas até o final do canal, é indicado o uso de dispositivos como tapete e/ou tela para minimizar as esteiras geradas pelas agulhas no escoamento e tentar uniformizar o escoamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CNPq, FAPEMIG, CAPES E PUC Minas.

REFERÊNCIAS

- [1] J. B. Barlow, W. H. Rae, A. Pope. *Low-Speed Wind Tunnel Testing*. United States of America, 1999.
- [2] A. M. Loredou-Souza, E. B. C. Schettini, M. J. Paluch. *Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento*. Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2004.
- [3] H. P. A. H. Irwin. *The design of spires for Wind simulation*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v.7, p.361-366, 1981.
- [4] J. Counihan. *An improved method of simulating na atmospheric bounary layer in a win tunnel*. Atmospheric Environment Pergamon Press, Vol. 3, pp. 197-214, 1969.
- [5] P. H. A. Barbosa, M. Cataldi, A. P. S. Freire. *Wind tunnel simulation of atmospheric boundary layer flows*. J. Braz. Soc. Mech. Sci. ,vol. 24, no. 3, Rio de Janeiro, July-2002.
- [6] B. Blocken, T. Stathopoulos, J. Carmeliet. *CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems*. Atmospheric Environment 41, p. 238-252, 2007.
- [7] S. T. Roballo, G. Fisch. *Escoamento atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA): Parte II – Ensaios no Túnel de Vento*. Revista Brasileira de Meteorologia, v.24, n.1, 87-99, 2009.
- [8] L. B. M. Pires, S. T. Roballo, G. Fisch, A. C. Avelar, R. da M. Girardi, R. Gielow. *Atmospheric flow measurements using the PIV and HWA techniques*. J. Aerosp. Technol. Manag.. São José os Campos, Vol. 2, n. 2, p. 127-136, May-Aug, 2010.
- [9] R. W. Fox, P. J. Pritchard e A. T. McDonald. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. Rio

- de Janeiro. LTC, 2010.
- [10] H. K. Versteeg; W. Malalasekera. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method*. 2 ed. Pearson Education.
- [11] S. T. Roballo. *Estudo do escoamento atmosférico no centro de lançamento de Alcântara (CLA) através de medidas de torre anemométrica e em túnel de vento*. Departamento de Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007.