

ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO NO CENTRO DE LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA (CLA): PARTE II – ENSAIOS NO TÚNEL DE VENTO.

SUELEN TRINDADE ROBALLO¹, GILBERTO FISCH², ROBERTO DA MOTTA GIRARDI²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (INPE/CPTEC), São José dos Campos-SP, Brasil

²Instituto Tecnológico de Aeronáutica/Instituto de Aeronáutica e Espaço (ITA/IAE), São José dos Campos-SP, Brasil

suelen.robalo@cptec.inpe.br, gfish@iae.cta.br, girardi@ita.br

Recebido Novembro 2007- Aceito Dezembro 2008

RESUMO

Estudou-se o escoamento atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA), localizado junto a uma falésia de 50 m de altura, através de simulações em túnel de vento (TV) do CTA/ITA, na escala geométrica 1:1000, com a realização de quatro diferentes ensaios. No TV, os ensaios com degraus de 90° e de 70°, correspondentes à falésia, ambos sem e com simulação de rugosidade adicional a sotavento deles, mostraram: (i) perfeita simulação do perfil de vento oceânico ($\alpha = 0,15$) sobre a posição do degrau representativo da falésia, utilizando pista de tapete, a montante, para prover a rugosidade necessária; (ii) número de Reynolds máximo possível com comprimento característico igual à altura do degrau neste TV foi $6,52 \cdot 10^4$, enquanto no CLA é da ordem de $3 \cdot 10^7$, razão pela qual é necessário um túnel mais potente; (iii) os expoentes mais próximos dos observados em Roballo e Fisch (2008) foram obtidos com um degrau reto, sem nenhum revestimento especial no piso normal do túnel, exceto o tapete a montante do degrau; (iv) a fixação de cubos a jusante do degrau para representar a vegetação resultou em rugosidades bem maiores que as observadas sobre a vegetação do CLA, possivelmente simulando situações urbanas ou industriais; (v) simulação das características típicas do escoamento após o degrau, tais como o descolamento, a formação de bolha de circulação e nova aderência; (vi) uso de TVs mais potentes certamente permitirá a simulação da situação atmosférica do CLA.

Palavras chaves: falésia, número de Reynolds, Lei de Potência, perfil de velocidade.

ABSTRACT: ATMOSPHERIC FLOW AT THE ALCANTARA LAUNCHING CENTER (ALC): PART II- EXPERIMENTS AT A WIND TUNNEL.

The atmospheric flow at the Alcântara Launching Center (ALC), which is localized near a 50 m cliff, was studied through analysis of wind tunnel (WT) experiments, using a 1:1000 geometric scale and floor level configurations to represent the cliff and its downwind roughness. The WT experiments, with 90° and 70° steps representing the cliff, both with and without additional downwind roughness, did show: (i) a perfect simulation of the ocean wind profile ($\alpha = 0.15$) above the position of the step representing the cliff, through the use of a upwind carpeted fetch to provide the necessary roughness; (ii) the highest Reynolds number possible, based on the height of the cliff, was 6.52×10^4 inside this WT, while it reached 3×10^7 at the ACL – thus, a more powerful tunnel is needed to simulate this last situation; (iii) the values of α nearest to the ones obtained at the ACL resulted from the 90° step experiment without any extra covering over the floor, except the upwind carpet; (iv) the fixing of cubes downwind of the step resulted roughness much greater than the ones observed over the ACL vegetation, so possibly simulating urban or industrial situations; (v) typical characteristics which occur downwind a step were simulated, such as the detachment and the posterior reattachment of the flow, plus the formation of circulation bubbles; (vi) the use of more powerful WTs would certainly permit the simulation of the atmospheric behavior of the ACL.

Keywords: cliff, Reynolds number, Power Law, velocity profile.

1. INTRODUÇÃO

O túnel de vento tem-se mostrado de grande utilidade em estudos de micrometeorologia, tendo como vantagens a facilidade de controlar a realização de medidas através de análises de sensibilidade, bem como custos de realização menores. Geralmente os túneis de vento são formados por ventiladores, tubos para a circulação do ar, corredores para o escoamento e uma área reservada para os ensaios, equipada com uma balança cujos sensores estão conectados a computadores. Podem ser de dois tipos: circuito fechado (escoamento circulando em tubos em forma de anel) ou aberto (escoamento absorvido em um extremo e descarregado em outro). Além disso, os túneis também podem ter estratificação térmica, através do aquecimento de uma placa na parte inferior. Diversos estudos têm sido realizados com a utilização do túnel de vento. Dentre eles estão análises do vento atmosférico em regiões próximas a plataformas de lançamento de foguetes, como o Centro Espacial de Naro na Coréia do Sul (Kwon et al., 2003), investigações de campos de dispersão de poluentes em torno de alguns obstáculos (Mavroidis et al., 2003) além de simulações de regiões com topografia complexa para analisar o escoamento sobre montanhas com variações de rugosidades superficiais (Cao e Tamura, 2006). No Brasil, porém, o uso ainda é pequeno. Ressaltam-se os estudos de Loredou-Souza et al. (2004) e de Marciotto et al. (2005), porém nenhum deles realizou um estudo que possua um desnível topográfico para aumentar e dificultar a complexidade do escoamento.

Este trabalho pretende simular o escoamento atmosférico na região do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) utilizando-se de um túnel de vento e é uma extensão do estudo realizado por Roballo e Fisch (2008). Esta região localiza-se no litoral norte do Maranhão sendo que a costa apresenta uma relativa variação topográfica (falésias) com altura de 50 m. Depois de simulado o local de estudo, os objetivos foram analisar o escoamento atmosférico na região através de perfis de velocidades locais, parâmetros que compõem a Lei Logarítmica e Lei de Potência, além de cálculos de valores de intensidades turbulentas, desde a região oceânica até o interior do continente.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A região de estudo será focada no CLA, considerado o portal brasileiro para o espaço, possuindo coordenadas geográficas de 2°19' S e 44°22' W. Uma compreensão do regime de ventos e da turbulência atmosférica na Camada Limite Superficial (CLS) é de grande importância nos estudos da Meteorologia Aeroespacial, pois de suas características são extraídas informações básicas para o projeto e desenvolvimento

de foguetes de sondagem e Veículos Lançadores de Satélite (VLS). Os foguetes são projetados e construídos para suportarem uma determinada carga pela ação do vento na superfície, além do fato de que a sua trajetória, controle e guiagem são determinados pelo perfil do vento. Diversos estudos sobre as características turbulentas do local já foram realizadas, quer seja por observações (Fisch, 1999 e Roballo e Fisch, 2008), quer seja por ensaios em túnel de vento (Pires et al., 2009). Também já foram realizados estudos sobre a atuação de sistemas atmosféricos no local (Barbosa et al., 2006, Coutinho e Fisch, 2007, entre outros).

Na região de Alcântara os ventos são muito persistentes, independentes da hora do dia (Fisch, 1999). Para este tipo de situação, com ventos fortes e velocidades médias superiores a 10 m/s o escoamento é turbulento o suficiente para que a mistura vertical produzida pela ação do vento (mecânica) suprima os efeitos térmicos (do empuxo) e a CLS possa ser tratada como adiabática e neutra (Loredou-Souza et al., 2004). Isso facilita o uso de túneis de vento sem estratificação térmica, como é o caso deste estudo.

A descrição do escoamento geralmente é realizada através de perfis de velocidades médias instantâneas locais. Várias leis experimentais permitem efetuar o ajuste de velocidades médias do vento. No presente caso foram usadas a Lei Logarítmica e a Lei de Potência. A variação de velocidade média U com a altura z até aproximadamente 100 m acima de uma superfície rugosa pode ser representada pela relação logarítmica, através da expressão:

$$U(z) = \left(\frac{u_*}{k} \right) \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (1)$$

em que u_* é a velocidade de atrito (m/s), k é a constante de Von Karman, cujo valor adotado é geralmente de 0,40 (Stull, 1988) e z_0 é o comprimento de rugosidade aerodinâmica (m).

A estimativa de z_0 é realizada através de dados de perfis verticais do vento e extrapolada para a altura em que o vento é nulo. Para regiões de mar aberto e calmo, o parâmetro de z_0 possui valores da ordem de 10^{-4} m, para regiões litorâneas 10^{-3} m, em regiões com muitas árvores e poucas construções ao redor situam-se entre 0,1 a 0,3 m e para regiões de subúrbios e centros urbanos com pouca densidade entre 0,4 e 0,6 m (Arya, 1988). Valores similares foram encontrados em Hsu et al. (1994) para as categorias de mar aberto (10^{-4} m) e regiões litorâneas (10^{-3} m). Para superfícies consideradas lisas, como lagos e campos abertos, este parâmetro apresentou-se na ordem de 0,03 m nos estudos de Blessmann (1995) e Alvarez y Alvarez e Wittwer (2006). Considerando terrenos urbanos, o valor de z_0 situou-se em torno de 0,3 m (Alvarez y Alvarez e Wittwer, 2006). Para

o CLA, o estudo observacional de Roballo e Fisch (2008) verificaram que para a estação chuvosa, z_0 possui o valor de 0,19 m e 0,06 m no período seco.

A Lei de Potência pode ser definida pela Eq. (2), em que $U(z_n)$ e $U(z_r)$ são valores de velocidades médias correspondentes, respectivamente, a uma altura z_n e uma altura de referência z_r .

$$\frac{U(z_r)}{U(z_n)} = \left(\frac{z_r}{z_n} \right)^\alpha \quad (2)$$

Geralmente assume-se a altura de referência como sendo de 10 m, que é a altura preconizada pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM). Os valores do expoente α (adimensional) dependem da estabilidade atmosférica, da velocidade do vento e da rugosidade aerodinâmica. Vários estudos têm mostrado que o expoente α possui valor de aproximadamente 1/7 (0,14), e descreve os perfis de vento nos primeiros 100 m em condições de estabilidade próximas à neutralidade (Farrugia, 2003). Segundo Arya (1988) este expoente alcança valores de 0,10 para superfícies lisas tais como mar, neve e gelo e em torno de 0,40 para superfícies de área urbana bem desenvolvida. Alguns trabalhos encontraram, para α , valores de 0,15 (Blessmann, 1973) e 0,11 (Hsu et al., 1994; Loredo-Souza et al., 2004) no caso de superfície oceânica. Para campos abertos este valor situa-se em torno de 0,17 (Alvarez y Alvarez e Wittwer, 2006). Já para terrenos mais rugosos, tais como florestas ou regiões com obstáculos, os valores de α são da ordem de 0,31 (Hsu et al., 1994), 0,34 (Loredo-Souza et al., 2004) e 0,25 (Alvarez y Alvarez e Wittwer, 2006). Em Roballo e Fisch (2008) mostrou-se que para o CLA, o valor médio mensal do expoente α variou de 0,19 a 0,27 ao longo dos meses do ano, sendo maiores no período chuvoso e menores na época seca.

Em condições próximas a neutralidade a turbulência atmosférica é puramente originada pelo cisalhamento do vento e depende do atrito da superfície e o cisalhamento vertical do vento. Geralmente os valores de médias estatísticas e de flutuações são usados para representar a estrutura turbulenta, porém, neste trabalho ela dependerá do conceito de intensidade turbulenta, definida como a razão entre o desvio padrão (σ) e a velocidade média do vento (U), a saber:

$$I = \sigma/U \quad (3)$$

2.1 Descrição do túnel de vento

O túnel de vento utilizado, da *Plint & Partners LDD Whokingham Bershire England* (Serial n° TE 44/5065) está instalado no Laboratório Kwein Lien Feng do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). A câmara de ensaios possui

altura e largura de 460 mm e comprimento de 1200 mm. A faixa de velocidade está entre 0–30 m/s, porém a velocidade máxima alcançada foi de 22 m/s. O túnel é de circuito aberto, como pode ser observado na Figura 1.



Figura 1 - Túnel de vento do CTA/ITA utilizado.

A câmara de ensaios do túnel de vento utilizado, possui uma altura de 460 mm, a redução de escala com relação ao tamanho real foi de 1:1000. Devido às dimensões do túnel, foi necessário prolongar a câmara de ensaios e para isto acoplou-se um canal de madeira no túnel, utilizado nos trabalhos de Wittmann (1995) e Santa Catarina (1999). O aparato canal é uma estrutura de madeira, sem tampa, livre nas extremidades, com paredes laterais paralelas entre si e perpendiculares ao piso do túnel. A largura interna do canal é de 410 mm, sendo que as espessuras da parede são de 10 mm. A Figura 2 apresenta o canal de madeira acoplado ao túnel de vento.

Para que fosse possível simular o perfil de vento atmosférico no túnel de vento semelhante ao que ocorre na região de Alcântara, utilizou-se a técnica das “spires”, que



Figura 2 - Vista do túnel de vento com o canal de madeira acoplado

consistem de placas triangulares, confeccionadas com chapas de aço. Cada “spire” é constituída de duas chapas recortadas e dobradas unidas por solda ponto. São dispostas na entrada da câmara de ensaios e, combinadas com a rugosidade de um tapete inserido no piso do túnel de vento, servem para emular o perfil de camada limite ao vento. Foram utilizadas três “spires” com altura de 307,7 mm e largura da base de 32,6 mm cada, conforme mostra a Figura 3:

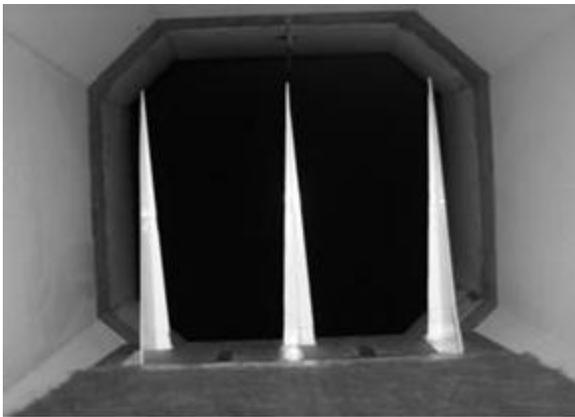


Figura 3 - Disposição das “spires” no experimento.

Utilizou-se um dispositivo rugoso junto ao piso do túnel para fornecer uma contribuição de arrasto necessário para a completa formação da camada limite no túnel de vento. O dispositivo escolhido foi um tipo de tapete, selecionado após a realização de vários testes. Uma extensão da parte do aparato canal que entra na câmara de ensaios foi realizada de forma a cobrir toda a câmara de ensaios (1200 mm). A Figura 4 representa uma vista lateral da montagem dentro do túnel de vento, onde se observa que na entrada da câmara de ensaios foram fixados os dispositivos que fornecem o perfil de camada limite ao escoamento (“spires” e um tapete de 131 cm). Para simular a falésia do local, utilizou-se um “aparato degrau”, construído de madeira e fixado dentro do aparato canal a

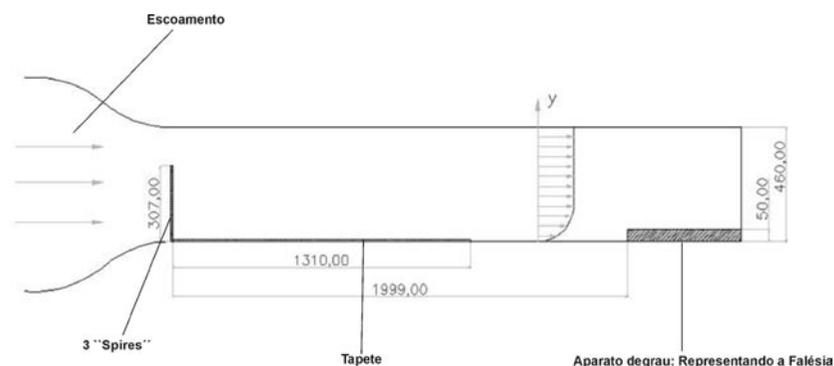


Figura 4 - Vista lateral da montagem da maquete no túnel de vento (medidas em mm).

uma distância de 1999 mm das “spires”. O piso do “aparato degrau” que entra na câmara de ensaios ficou a 50 mm do piso do túnel. Maiores detalhes do design experimental encontra-se em Roballo (2007).

2.2 Anemometria de fio quente

A anemometria de fio quente (AFQ) constitui um método de investigação pouco intrusivo devido às pequenas dimensões do elemento sensível. Essas pequenas dimensões, combinadas a um circuito eletrônico de controle, fazem com que esta técnica forneça elevadas frequências de resposta, podendo atingir a ordem de centenas de kHz. O anemômetro de fio quente consiste, basicamente, de um filamento aquecido que fica exposto ao escoamento de um fluido. Este filamento fica conectado a um circuito eletrônico que é capaz de monitorar sua variação de resistência elétrica estabelecendo, desta forma, uma relação de pertinência entre a velocidade do escoamento e a resistência observada no filamento aquecido. Para medição de velocidade, os números de fios geralmente correspondem às componentes do vetor velocidade que o sensor é capaz de medir. Neste trabalho, utilizou-se de um sensor com um único fio, correspondente ao anemômetro de fio quente unidirecional, como ilustrado na Figura 5.

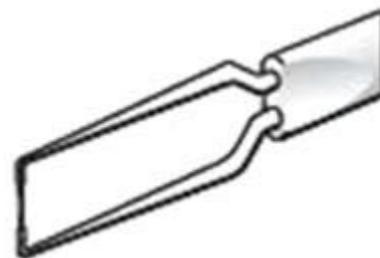


Figura 5 - Anemômetro de fio quente.

O princípio de funcionamento é baseado na transferência de calor por convecção entre um fio aquecido e o fluido escoando ao seu redor. O instrumento é composto por um pequeno sensor, que realiza a avaliação pontual do escoamento e por um circuito controlador. Este último é composto por uma ponte de Wheatstone, em que o sensor é na verdade, um dos resistores integrantes da ponte e por um circuito de retro-alimentação. O tipo de anemômetro utilizado foi o de temperatura constante (CTA - *Constant Temperature Anemometer*) que consiste basicamente de um fio de metal (neste caso, tungstênio) com diâmetro da ordem de $5 \mu\text{m}$ e comprimento da ordem de 1,25 mm. Na ponte de temperatura constante (CTA) o filamento funciona sobreaquecido, a ponte de Wheatstone opera com uma resistência de sobreaquecimento constante, cujo valor é calculado e ajustado na própria ponte. O circuito de retro-alimentação é responsável por enviar a corrente necessária para balancear a ponte de Wheatstone através do aumento da resistência do sensor. Isso acontece porque o fio possui um coeficiente térmico de resistividade (α_0), o que significa que quando a temperatura do filamento varia, o mesmo acontece com a sua resistência. Em condições de operação, o circuito de controle (circuito de retro-alimentação) aplica uma corrente elétrica à ponte de Wheatstone e promove, assim, o aumento de temperatura e de resistência do sensor de fio quente até um valor pré-determinado (geralmente em torno de 250°C). Nessa condição de equilíbrio, a ponte está balanceada. Um pequeno aumento de velocidade provoca um resfriamento do sensor, diminuição de sua resistência e conseqüentemente desbalanceamento da ponte de Wheatstone. Isso faz com que o circuito de retro-alimentação aumente a corrente que alimenta a ponte, aquecendo o sensor de modo a levar a ponte novamente à condição de equilíbrio. Sendo a resposta do circuito muito rápida, a temperatura do sensor deverá permanecer constante ao longo da variação da velocidade do fluido.

2.3 Metodologia

Inicialmente algumas medidas foram feitas sem o “aparato degrau” para ajustar o expoente alfa da Lei de Potência (Eq. 2) para um valor de 0,15. Este valor é típico de superfícies lisas como o oceano (Blessmann, 1973). Vários testes foram realizados, alterando-se o comprimento e o tipo de tapete para obter este valor característico de alfa. Foram realizadas medidas em várias posições (Figura 6) para verificar a variação espacial de alfa.

Os gráficos da Figura 7a e 7b apresentam os perfis adimensionais de velocidades médias, $U(z)/U(z_{250})$ e dos desvios médios quadráticos da velocidade, $\sigma(z)/\sigma(z_{250})$, para as posições 1, 2 e 3 da Figura 6 (ajuste inicial). Segundo Blessmann (1973), para a camada limite real, a espessura da camada limite (δ) aproxima-se de 280 m. Desta forma, devido às dimensões do túnel, optou-se por medir perfis de velocidades até a altura de 250 mm durante o ajuste inicial, pois até esta altura encontrava-se a CLS. Estes perfis de velocidade média correspondem a um expoente alfa no valor de 0,15 da Lei de Potência, como desejado.

Após o ajuste do perfil de camada limite, um aparato degrau foi inserido no túnel de vento (Figura 8a) para representar a falésia. Este aparato degrau foi colocado a uma distância de 1990 mm de “spires” (na posição 1 da Figura 6) e os resultados obtidos foram denominados Ensaio 1. A partir do momento que o degrau foi inserido no túnel de vento, realizaram-se medidas de perfis de velocidades até a altura de 210 mm, pois nesta altura já era observado um perfil de camada limite totalmente desenvolvido. As alturas de medidas são: 6,0, 10,0, 16,3, 28,5, 43,0, 70,0, 90,0, 110,0, 130,0, 150,0, 170,0, 190,0 e 210,0 mm, sendo que as primeiras seis alturas correspondem aos seis níveis da Torre Anemométrica (TA) existente no CLA e localizada a uma distância de 200 m da falésia considerando a direção

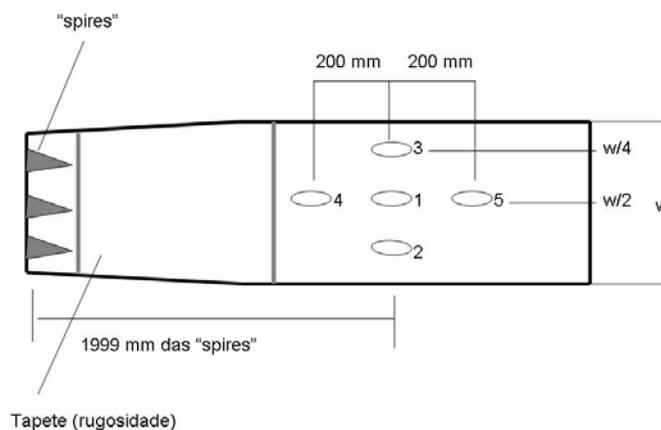


Figura 6 - Vista superior do canal mostrando como foi colocado o tapete e os pontos onde foram obtidos os perfis de camada limite para o ajuste inicial.

preferencial do vento (Roballo e Fisch, 2008). A máxima velocidade obtida no túnel de vento foi próxima a 22,0 m/s correspondente ao Número de Reynolds na ordem de $6,52 \cdot 10^4$, considerando como comprimento característico a altura da falésia na escala do túnel de vento (50 mm).

Para investigar a influência da falésia no escoamento e no desenvolvimento da turbulência causada por uma mudança brusca de superfície, outros três ensaios foram realizados no túnel de vento. As figuras abaixo representam as configurações dos degraus utilizados nestes ensaios. Cubos de madeira de 3 mm (Figura 8c e 8d) foram utilizados no intuito de simular a vegetação do CLA que apresenta-se homogênea, característica de região de restinga com altura média de 2 a 3 m.

3. RESULTADOS

A Figura 9 representa o esquema do aparato experimental utilizado durante os ensaios, no qual se definiu um sistema de coordenadas x (longitudinal), y (lateral) para descrever as

posições em que foram medidos perfis de velocidades locais e respectivos desvios médios quadráticos do vento. A parte negativa do eixo x correspondeu à região oceânica e a parte positiva à superfície continental, estando o degrau posicionado em $x=0$.

3.2 Perfis de camada limite

Para verificar o comportamento da camada limite com diferentes topografias, realizaram-se quatro ensaios experimentais (Figura 10), descritos a seguir. As Figuras 10a e 10b representam os perfis de velocidades médias e respectivos desvios médios quadráticos do vento para o Ensaio 1. Foram realizadas medidas na região central da seção de testes ($y = 0$), variando a posição longitudinal desde $x = -150$ mm até $x = 300$ mm. É possível observar a modificação dos perfis ao encontrar a região da falésia (posição $x = 0$). Nota-se que os valores de velocidades médias são mais baixos após o escoamento passar por este ponto de descontinuidade. Isto se deve aos altos valores de flutuações, principalmente próximo a superfície, indicando

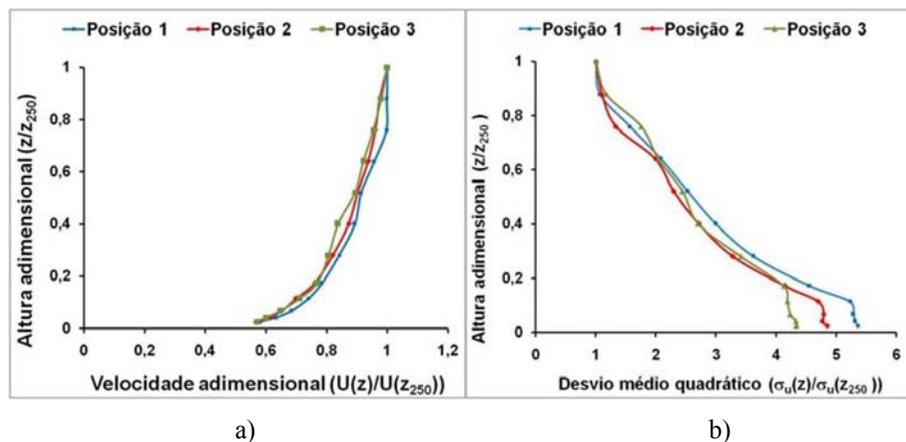


Figura 7 - Perfis de velocidades locais (a) e desvios médios quadráticos locais das flutuações de velocidade (b).

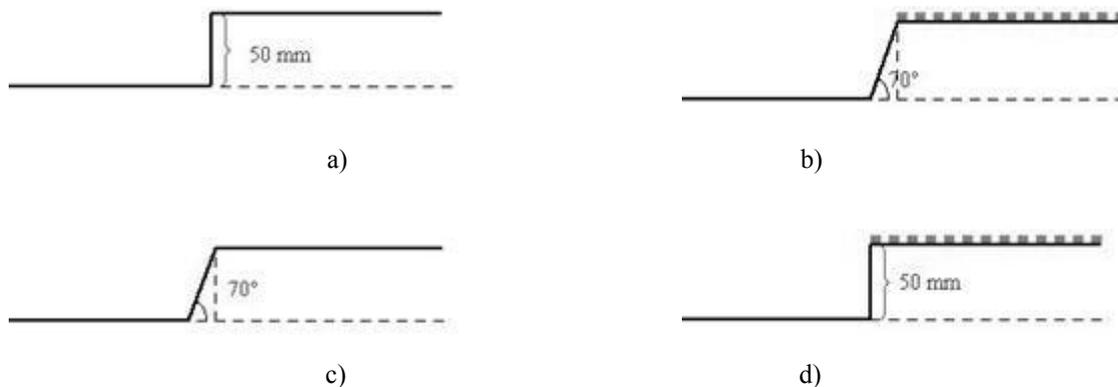


Figura 8 - Degraus utilizados na simulação no túnel de vento. a) Ensaio 1 (degrau reto), b) Ensaio 2 (degrau inclinado), c) Ensaio 3 (degrau inclinado com vegetação), d) Ensaio 4 (degrau reto com vegetação)

a ocorrência de turbulência devido à presença do degrau, prevalecendo sua influência até pelo menos 300 mm de distância horizontal. Nas Figuras 10c e 10d são apresentados os perfis de velocidades médias e desvios médios quadráticos, novamente, ao longo do eixo x, para a situação em que se utilizou um “aparato degrau” inclinado (70°) denominado Ensaio 2. Neste ensaio, verifica-se que os perfis a montante do degrau são semelhantes aos do Ensaio 1 (Figuras 10a e 10b), enquanto a sotavento, a principal diferença foi o fato de o perfil de velocidades médias não ter apresentado características de perfil uniforme a uma distância de 300 mm do degrau, embora os valores de flutuações já estivessem diminuindo. Através deste comportamento, pôde-se concluir que a região de recirculação foi mais extensa comparada à situação de degrau reto (Ensaio 1). Nos Ensaios 3 e 4, sobre a superfície a jusante dos respectivos degraus utilizados (inclinado, 70° e reto, 90°) fixaram-se cubos de madeira de 3 mm para simular a vegetação do CLA. Os perfis obtidos no Ensaio 3 (degrau inclinado com vegetação) são mostrados nas Figura 10e e 10f, para, novamente, as posições que se estendem desde 150 mm a montante ($x = -150$ mm), até 300 mm a jusante ($x = 300$ mm). Neste ensaio, nota-se que na posição de $x=300$ mm, o perfil de velocidade média já apresentou características de escoamento uniforme, assemelhando-se ao perfil obtido na posição $x = -150$ mm (perfil antes de o escoamento ultrapassar o degrau). Este fato mostra que a presença dos cubos de madeira influenciou de forma significativa no perfil do vento para o caso de um degrau inclinado. Este mesmo comportamento pôde ser verificado no Ensaio 4 (degrau reto e com vegetação) apresentado nas Figura 10g e 10h,, o que permite concluir que a vegetação após o degrau teve mais impacto sobre o escoamento do que as inclinações dos aparatos degrau.

3.3 Velocidade de atrito (u_*) e comprimento de rugosidade aerodinâmica (z_0)

Os parâmetros meteorológicos (u_* e z_0) da Lei Logarítmica (Eq. 1) também foram calculados e comparados com os observacionais (Roballo e Fisch, 2008). A regressão linear é obtida plotando $\ln z$ versus $\ln U$ resultando na estimativa de k/u_* (coeficiente angular) e $\ln z_0$ (coeficiente linear). A distribuição de u_* e z_0 na linha central são mostradas na Figuras 11a e 11b, respectivamente. Observou-se que, na posição da quina do degrau ($x = 0$), há um decréscimo abrupto nos valores de u_* e z_0 para o Ensaio 1. Para os outros ensaios esta variação não é tão intensa devido a maior suavidade da topografia (Ensaio 2 e 3) ou inclusão da vegetação (Ensaio 4). A distribuição de z_0 (Figura 11b) apresentou um comportamento semelhante ao de u_* . À medida que o escoamento se distanciou do degrau, os valores de z_0 se aproximam de zero, principalmente próximo à posição $x = 300$ mm. Comparado com os resultados observacionais em Roballo e Fisch (2008) para a posição que estaria a TA no CLA, os valores de z_0 no túnel de vento apresentaram-se bastante elevados na posição $x=200$ mm, não sendo possível compará-los.

A Tabela 1 apresenta os resultados de u_* na posição $x = 200$ mm correspondente a posição da TA no CLA. Nesta tabela, os resultados observacionais obtidos em Roballo e Fisch (2008) também estão presentes. Observa-se que o resultado no túnel de vento mais próximos aos observacionais correspondeu ao Ensaio 2.

2.2 Intensidades turbulentas

As intensidades turbulentas (Eq.3) foram calculadas com a velocidade e seus respectivos desvios padrões em alturas

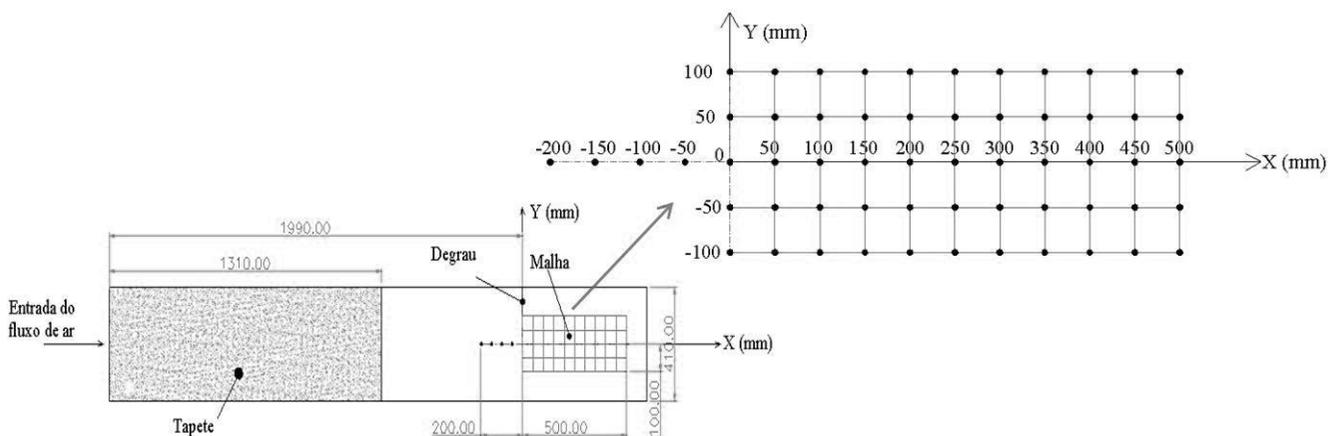


Figura 9 - Vista superior do esquema de montagem do aparato experimental com o sistema de coordenadas x (longitudinal) e y (lateral) e o detalhe da malha.

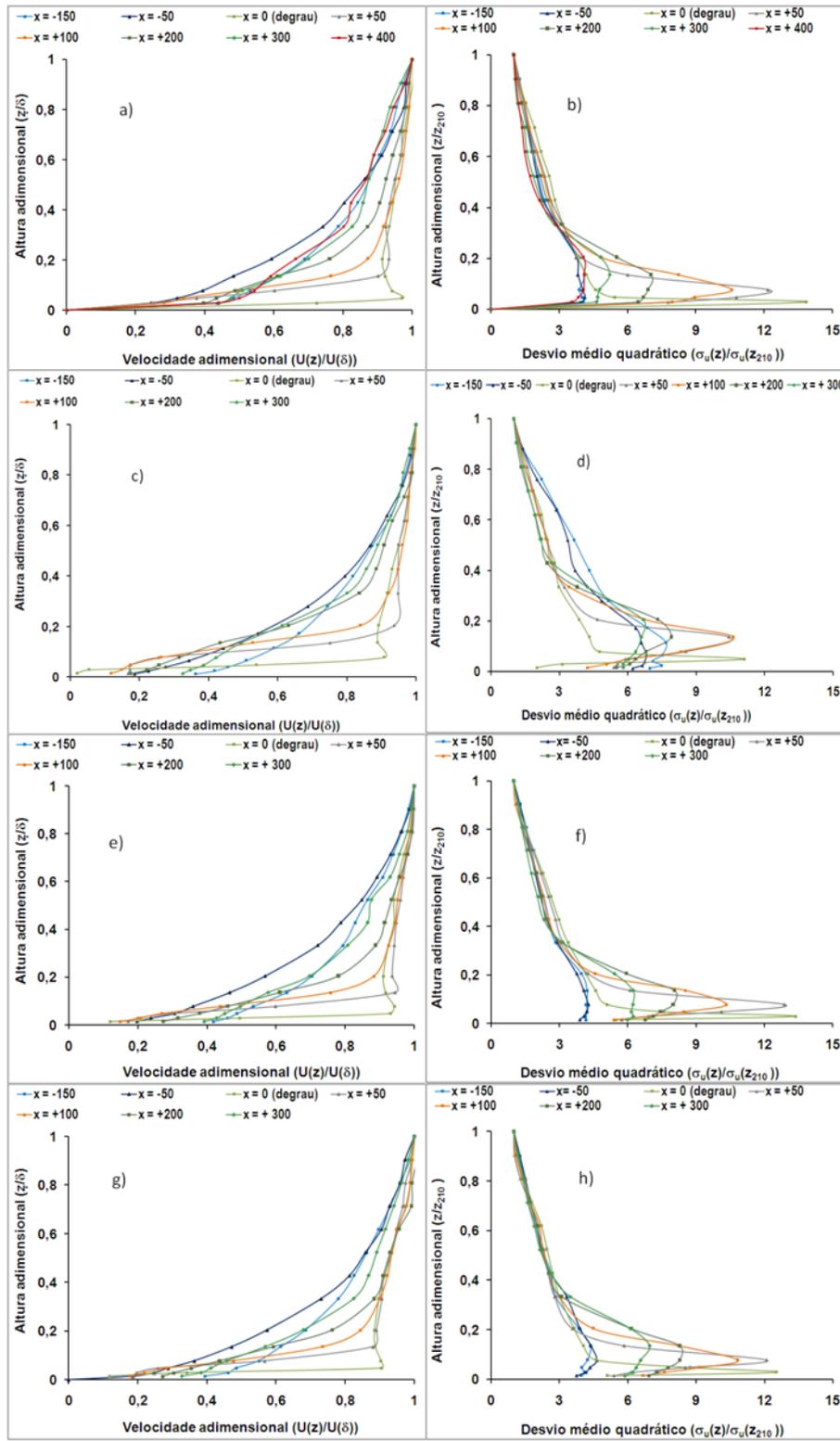


Figura 10 - Perfis de velocidades médias locais para Ensaio 1 (a), Ensaio 2 (c), Ensaio 3 (e) e Ensaio 4 (g), e flutuações para Ensaio 1 (b), Ensaio 2 (d), Ensaio 3 (f) e Ensaio 4 (h) ao longo da linha central.

Tabela 1 - Comparações dos valores de u_* para todos os ensaios.

Velocidade de atrito(u_*)		Valor absoluto (m/s)	Velocidade característica (m/s)	Valor adimensional	Reynolds
Túnel de vento	Ensaio 1	1,80	22	0,08	$6,52 \cdot 10^4$
	Ensaio 2	1,20	22	0,05	$6,52 \cdot 10^4$
	Ensaio 3	1,47	22	0,06	$6,52 \cdot 10^4$
	Ensaio 4	1,53	22	0,07	$6,52 \cdot 10^4$
Observacional	Período chuvoso	0,3-0,4	8	0,04	$2,37 \cdot 10^7$
	Período seco	0,4-0,5	10	0,04	$2,92 \cdot 10^7$

Os valores observacionais referem-se ao trabalho de Roballo e Fisch (2008).

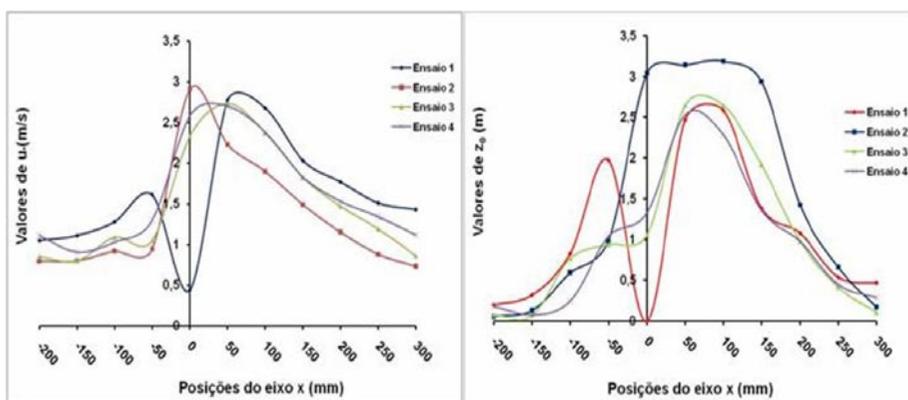


Figura 11 - Distribuição de u_* (a) e z_0 (b)

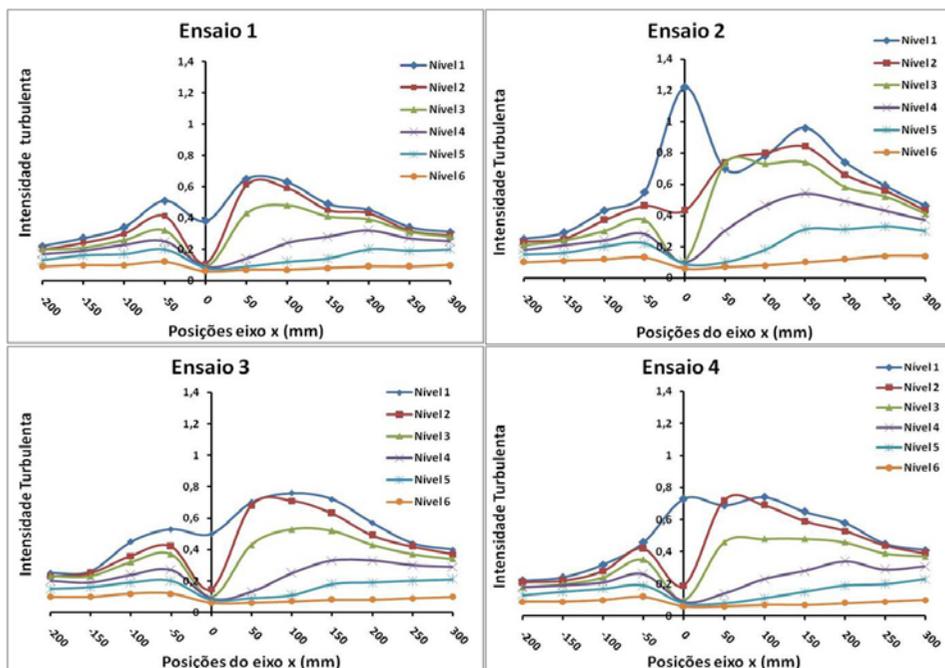


Figura 12 - Distribuição de intensidade turbulenta ao longo da linha central (posição $y = 0$) para todos os ensaios.

correspondentes aos níveis da TA (Roballo e Fisch, 2008). Nos gráficos da Figura 12 é possível observar que as intensidades turbulentas são altas próximas a superfície, principalmente próximo ao ponto de descontinuidade, alcançando valores de 1,2 no nível 1 (6 mm) para o caso do Ensaio 2. Há um decréscimo significativo de I com a altura e no nível 6 (altura de 70 mm) os valores de I estão em torno de 0,1 para todas as posições ao longo da linha central, para todos os ensaios.

3.5 Expoente alfa

Os valores do expoente alfa da Lei de Potência foram obtidos através da linearização da Equação 2:

$$\log\left(\frac{U(z)}{U(z_r)}\right) = \alpha \left[\log\left(\frac{z}{z_r}\right) \right] \quad (4)$$

e plotando $\log(U(z)/U(z_r))$ versus $\log(z/z_r)$. O expoente α é calculado através do ajuste de regressão (coeficiente angular) e a Figura 13 mostra um exemplo deste procedimento.

A Tabela 2 abaixo sumariza os resultados de todos os ensaios em posições desde $x = -200$ mm até $x = 300$ mm. Através desta tabela é possível observar que a Lei de Potência não pode ser aplicada em posições próximas ao degrau, devido à região de recirculação causada pela mudança de rugosidade. Na posição $x = -200$ mm, os expoentes alfas são aproximadamente iguais para todos os Ensaios, indicando que o degrau não está influenciando nesta posição. Os valores de alfa na posição de $x = 200$ mm (que corresponde a posição da TA no CLA) são maiores que os observacionais (Roballo e Fisch, 2008). Na posição de $x = 300$ mm os valores começam a se aproximar dos valores obtidos na TA.

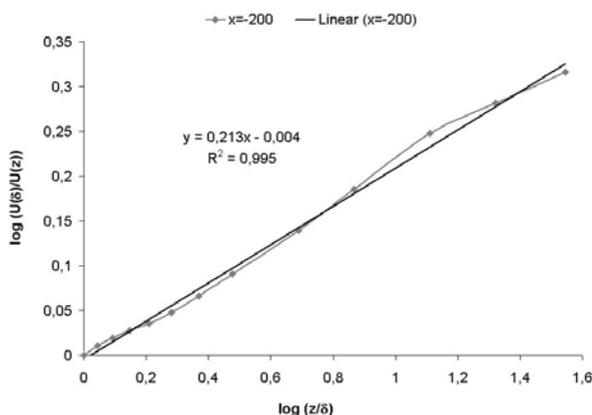


Figura 13 - Exemplo da determinação de alfa pela Eq. 4.

Tabela 2 - Valores de alfa para a linha central (posição $y=0$)

Posição (eixo x)	Alfas			
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
X = -200	0,21	0,20	0,21	0,22
X = -150	0,24	0,24	0,22	0,22
X = -100	0,31	0,34	0,36	0,28
X = -50	0,40	0,41	0,41	0,41
X = 0	-	-	-	-
X = 50	-	-	-	-
X = 100	-	-	-	-
X = 150	-	-	-	-
X = 200	-	0,46	0,34	0,35
X = 250	0,24	0,39	0,27	0,28
X = 300	0,24	0,30	0,24	0,28

3.6 Região de recirculação

Pelo fato de existir o ponto de descontinuidade na posição do degrau, em que ocorre a separação do escoamento da superfície, analisou-se a região de recirculação (chamada de bolha de circulação) do fluxo de ar e os pontos em que o escoamento volta à superfície do túnel (ponto de recolamento), para os casos do degrau reto e do inclinado (Ensaios 1 e 2). Optou-se em realizar esta análise através de perfis de velocidades médias e seus desvios médios quadráticos normalizados pelos valores correspondentes a altura de 210 mm. Os pontos longitudinais considerados para as estas medidas tiveram pequenas variações, começando na região em cima do degrau ($x = 0$ mm) e deslocando-se até $x = 150$ mm. Em vista da geometria do dispositivo de fio quente não foram possíveis medidas a montante do degrau, muito próximas dele. A variação vertical também foi muito pequena nos níveis mais baixos, variando-se de 1 em 1 mm (1 em 1 m na escala real) até altura de 10 mm (10 m), seguida de 2 em 2 mm até a altura de 20 mm e, a partir desta altura, os intervalos foram maiores. O maior detalhamento nos níveis inferiores teve a finalidade de detectar as variações mais intensas do escoamento próximo à superfície, quando da ocorrência de uma mudança brusca desta, neste caso, um degrau.

A Figura 14 apresenta os perfis verticais de velocidades médias obtidos a jusante do degrau nos Ensaios 1 e 2, ao longo do eixo longitudinal do túnel, enquanto a Figura 15 mostra os perfis de desvios médios quadráticos correspondentes. A velocidade após o degrau reto, com a altura, aproxima-se rapidamente de seu valor na camada limite externa. Próximo à superfície, a velocidade após o degrau reto é maior que a após o degrau inclinado, invertendo-se a situação acima de uma altura que tende à altura adimensional 0,2. Para o degrau reto, os desvios médios quadráticos correspondentes são maiores, e ocorrem em alturas inferiores àquelas para o degrau inclinado, até a distância de cerca de 90 mm a jusante, posição após a

qual os seus valores máximos são menores que os referentes ao degrau inclinado. Isto demonstra que a bolha de descolamento formada após o degrau reto é menor, porém mais intensa que a que ocorre com o degrau inclinado. Portanto, a inclinação do degrau suaviza a turbulência por ele causada, mas faz seus efeitos persistirem até maiores distâncias a jusante, em que ocorre o re-colamento do escoamento.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho estudou-se o escoamento atmosférico no CLA utilizando-se de um túnel de vento. Para isto foi necessário simular primeiramente um perfil de vento oceânico ($\alpha = 0,15$) em uma determinada posição, sendo este o ponto em que seriam colocados os “aparatos degrau” para simular a falésia existente

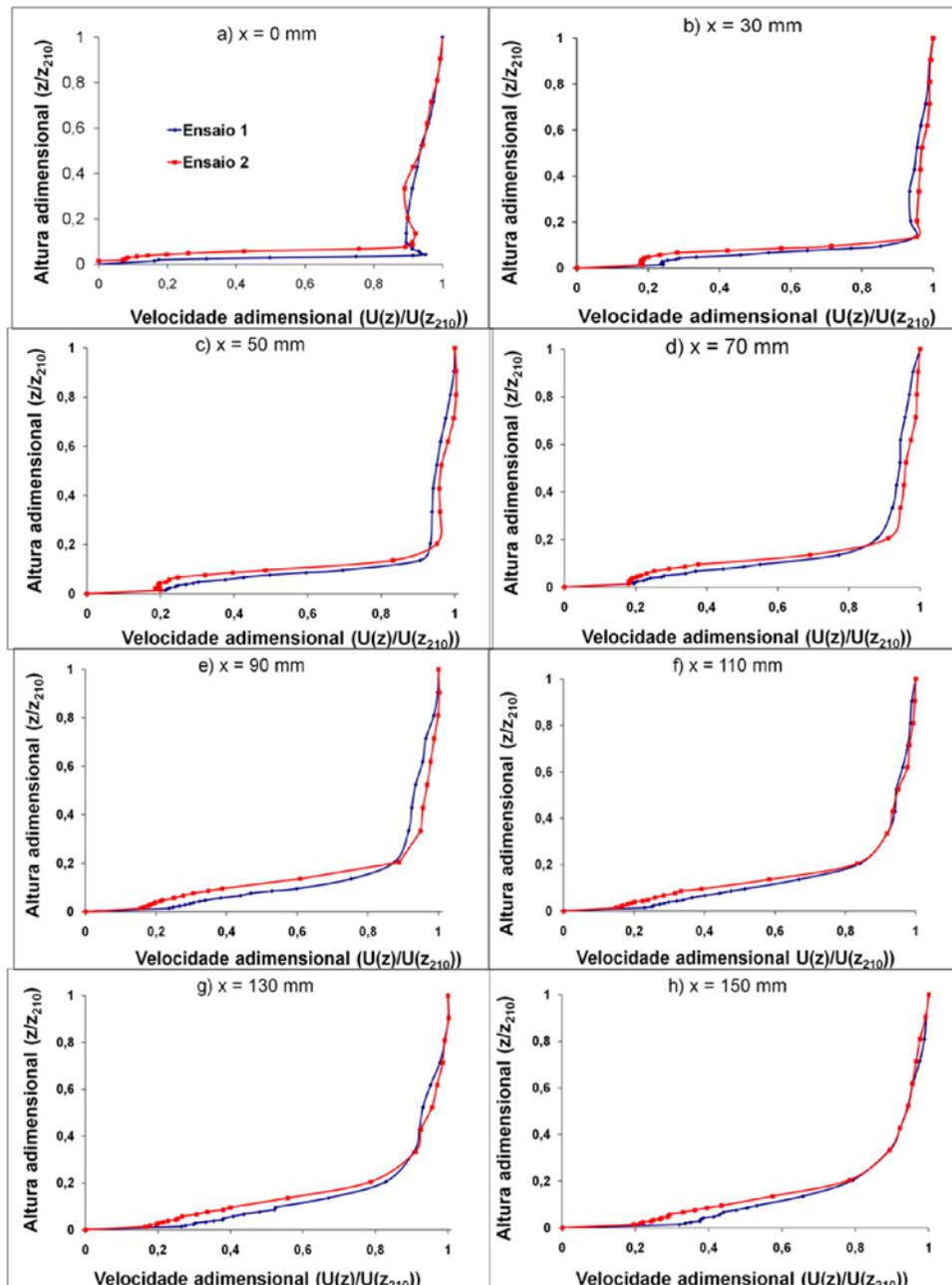


Figura 14 - Comparações de perfis de velocidades médias.

na região do CLA. Devido às limitações de velocidade alcançada no túnel de vento não foi possível atingir o número de Reynolds atmosférico (da ordem de 10^7), sendo necessária a utilização de túnel de vento mais potente e que possua uma redução de escala maior. Os parâmetros calculados no experimento no túnel de vento (u_* , z_0 , α) apresentaram-se maiores do que os observacionais na posição em que estaria localizada a TA no CLA. Com relação ao expoente alfa, os valores mais próximos dos observados foram obtidos com um degrau reto, sem nenhum revestimento especial no piso normal do túnel, exceto o tapete

a montante do degrau. A fixação de cubos a jusante do degrau resultou em rugosidades bem maiores que as observadas sobre a vegetação do CLA, possivelmente simulando situações urbanas ou industriais. Embora não tenha sido possível simular a situação do CLA, observaram-se características típicas do escoamento após o degrau, tais como o descolamento, a formação de bolha de circulação e nova aderência. Os altos valores de z_0 na posição da TA estão relacionados ao baixo número de Reynolds obtido no túnel de vento, o que faz a região de recirculação se prolongar comparado com a situação real.

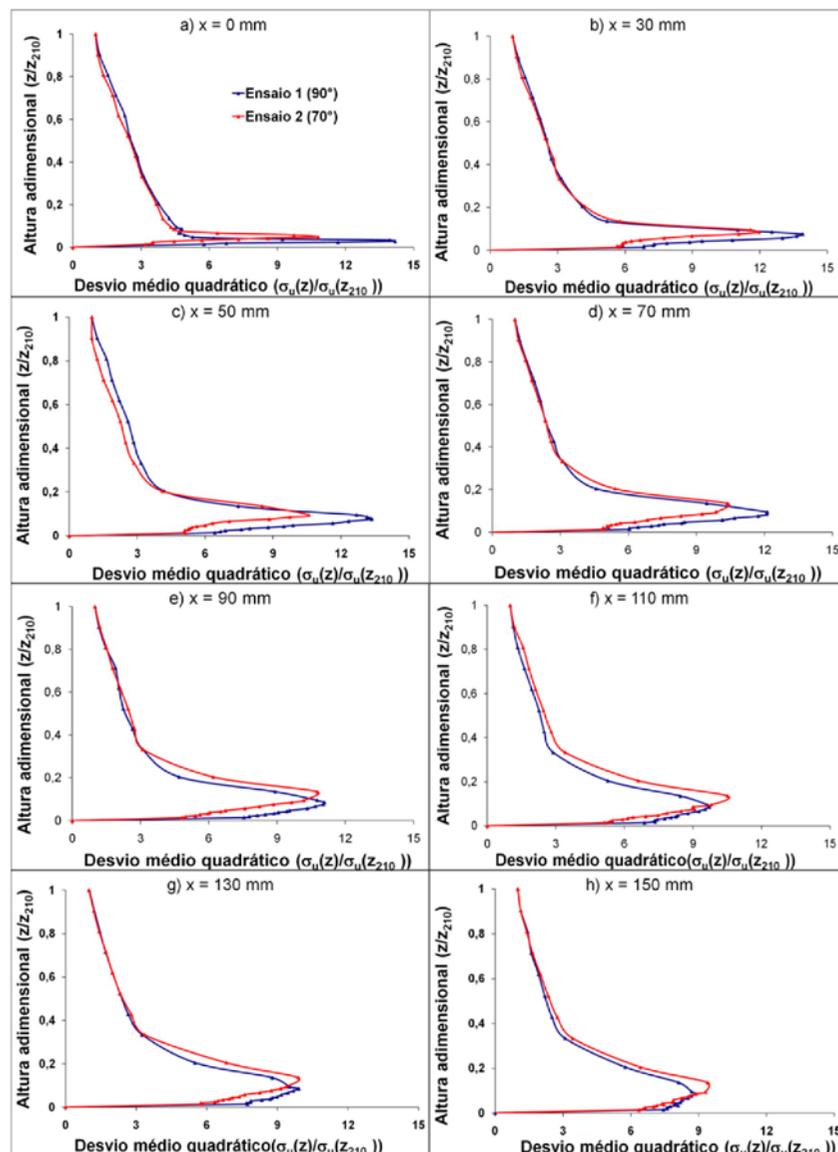


Figura 15 - Comparações de perfis de desvios médios quadráticos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ Y ALVAREZ, G. M.; WITTWER, A.R. Análisis de los Parámetros del Perfil de Viento en La CL Simulada en un Túnel de Viento (CD-ROM). In: ESCOLA DE PRIMAVERA DE TRANSIÇÃO E TURBULÊNCIA - EPPT, 2006, Rio de Janeiro. Anais ... Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas-ABCM p..
- ARYA, S. P. Introduction to Micrometeorology. San Diego, Academic Press. 1988.
- BARBOSA, R. L.; OYAMA, M. D.; MACHADO, L. A. Climatologia das perturbações convectivas iniciadas na costa norte do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 21, n. 1, pp. 107-117, 2006.
- BLESSMANN, J. Simulação da Estrutura do Vento Natural em um Túnel de Vento Aerodinâmico. Tese (Doutor em Ciências). Instituto de Aeronáutica e Espaço – ITA, São José dos Campos, 1973.
- BLESSMANN, J. O vento na engenharia estrutural. Porto Alegre. Editora da Universidade Federal do Rio Grande (UFRGS), 1995, 166p.
- CAO, S.; TAMURA, T. Experimental study on roughness effects on turbulent boundary layer flow over a two-dimensional steep hill. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. n.1,v. 94, p.1-19, 2006
- COUTINHO, E. C.; FISCH, G. Distúrbios ondulatorios de leste (DOLs) na região do Centro de Lançamento de Alcântara - MA. *Revista Brasileira de Meteorologia*. v.22, n.2, p.193-203, 2007 .
- FARRUGIA, R.N. The wind shear exponent in a Mediterranean island climate. *Renewable Energy*. v. 28, n. 4, p. 647-653, 2003.
- FISCH, G. Características do Perfil Vertical do Vento no Centro de Lançamento de Foguetes de Alcântara (CLA). *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 14, n.1, p. 11-22, 1999.
- HSU, A. S.; MEINDL, E.A.; GILHOUSEN, D.B. Determining the Power-Law Wind-Profile Exponent under Near-Neutral Stability Conditions at Sea. *Journal of Applied Meteorology*. v.33, n.6, p.757-765, 1994.
- KWON K. J.; LEE J.Y; SUNG B. PIV Measurements on the Boundary Layer Flow around Naro Space Center. 5 th International Symposium on Particle Image Velocimetry, p. 22-24, 2003.
- LOREDO-SOUZA, A.M; SCHETTINI, E. B. C; PALUCH, M.J. Simulação da Camada Limite Atmosférica em Túnel de Vento. In: Möller, S. V.; Silvestrini J. H. (Org.). *Turbulência*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas - ABCM, 2004, v.4, p.137-163.1 CD-ROM.
- MARCIOTTO, E. R.; et al. Caracterização da Camada Limite Turbulenta com um Túnel de Vento Atmosférico: Resultados Preliminares. *Revista Ciência e Natura*, v. único, p. 449 - 456, 2005. Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, 4. Santa Maria – RS.
- MAVROIDIS; I. GRIFFITHS, D. J. H. Field and wind tunnel investigations of plume dispersion around single surface obstacles. *Atmospheric Environment*. v. 37, n. 21, p. 2903-2918, 2003.
- PIRES, L. B. M. et al. A study of the Internal Boundary Layer and turbulence generated at the Alcântara Launching Center. *Boundary Layer Meteorology*. [submitted].
- ROBALLO, S.; FISCH, G. Escoamento Atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA): Parte I - Aspectos Observacionais. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.23, n.4, 15p. . (Submetido em julho de 2007)
- SANTA CATARINA, M. F. Avaliação do Escoamento no Centro de Lançamento de Foguetes de Alcântara: Estudo em Túnel de Vento. São José dos Campos. Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Relatório Final de Atividades de Iniciação Científica, 1999.
- STULL, R. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Dordrecht, Kluwer Academic, 1988.
- WITTMANN, R.J. Estudo experimental de um escoamento sobre um degrau com face a jusante. Trabalho de Graduação. Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). São José dos Campos. Nov. 1995.