

DESENVOLVIMENTO DE UM ESCOAMENTO TIPO CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA EM TÚNEL DE VENTO COM PEQUENAS DIMENSÕES

Roberto M. Girardi

Mateus F. Santa Catarina

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Praça Mal. Eduardo Gomes, 50,
CEP.: 12.228-900, S. J. Campos, SP, Brasil. E-mail: girardi@aer.ita.cta.br

Resumo

O objetivo do presente trabalho é relatar a metodologia usada para desenvolver um escoamento com perfil de velocidade tipo camada limite atmosférica, no interior de um túnel de vento, semelhante ao escoamento encontrado sobre a superfície do oceano. Normalmente, túneis de vento para este fim possuem comprimento de seção de testes relativamente grandes, para permitir o desenvolvimento de um escoamento tipo camada limite. No presente trabalho, foi implementada uma outra maneira de se obter o escoamento requerido, através da utilização de triângulos isosceles, colocados no início da seção de testes, conhecidos na literatura como *spires*. Além disto foi necessário a utilização de uma manta de bidim, fixada à superfície inferior da seção de testes, a qual possibilitou o ajuste do perfil de velocidades requerido. Perfis de velocidade média e de flutuação (valor RMS) foram medidos em diversas posições da seção de testes e para vários números de Reynolds, de maneira a se verificar alterações no escoamento em questão.

Palavras-chave: Camada Limite Atmosférica, Túnel de Vento, Métodos Experimentais

1. INTRODUÇÃO

O relevo no Centro de Lançamento de Foguetes de Alcântara (CLA) lembra um degrau, pois o mar encontra um paredão com grande inclinação (falésia) que possui uma altura de aproximadamente 40 m, sendo o topo uma região relativamente plana. É nessa região, a cerca de 500m do paredão, que se encontra instalada a plataforma de lançamento. O vento marítimo que sopra do mar para a terra enfrenta a subida do paredão citado anteriormente, causando perturbações na posição da plataforma de lançamentos. A verificação da intensidade destas perturbações é a principal motivação do presente trabalho.

O primeiro passo desta pesquisa foi encontrar o método mais adequado para a simulação do vento atmosférico no interior de um túnel de vento com seção de testes com pequeno comprimento. Em geral, nos túneis onde as condições atmosféricas são simuladas, o vento flui ao longo de um piso rugoso de grande extensão. A desvantagem é que este processo exige um comprimento de cerca de 25 m para formar uma camada limite de 60 a 120 cm de altura, como posto por Blesmann (1973). Para este trabalho era requerida uma camada limite com espessura de aproximadamente 30 cm, porem, o túnel de vento disponível tem uma seção de testes com comprimento menor que 3 m. Existem diversos métodos para produção de um escoamento tipo camada limite

atmosférica. Alguns usam telas, outros barras paralelas dispostas horizontalmente e com espaçamento variável como usado por Owen e Zienkiewicz (1957). Blesmann (1973), em sua tese de doutorado, usou a técnica dos jatos transversais dispostos transversalmente à direção do vento. O método que se mostrou mais adequado e que foi utilizado para fazer a simulação, utilizou a técnica das *spires*, que são placas planas com o formato de triângulo isósceles, as quais são instaladas na entrada da seção de testes. Juntamente com as *spires* deve-se ter um piso com rugosidade, a qual tem papel fundamental no ajuste do perfil de velocidades requerido para a camada limite.

2. APARATO PARA SIMULAÇÃO DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

O vento natural apresenta um perfil de velocidade média adimensional (U/V_∞), que varia exponencialmente com a altura adimensionalizada (Y/δ), onde δ é espessura da camada limite atmosférica. Os valores do expoente α e de δ dependem do tipo de terreno, sendo que para vento marítimo os mesmos situam-se em torno de 0.15 e 280m respectivamente. A intensidade de turbulência, definida como a razão entre o valor *rms* das flutuações de velocidade e a velocidade na fronteira da camada limite (V_∞). Segundo Blesmann, a intensidade de turbulência para ventos marítimos é em torno de 0,08, independentemente da altura.

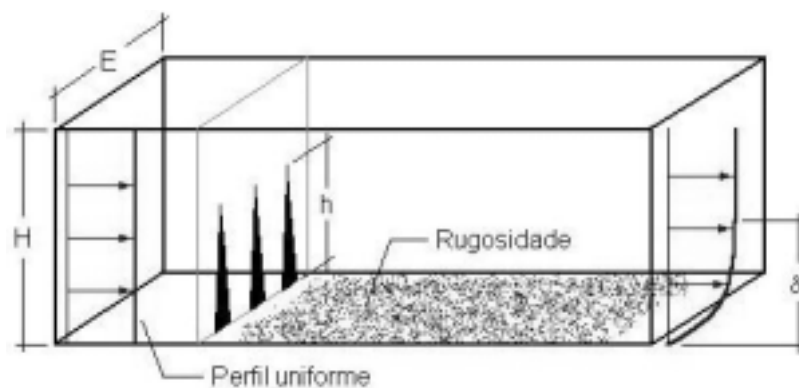


Figura 1 Seção de testes do túnel com 3 *spires* e rugosidade no piso.

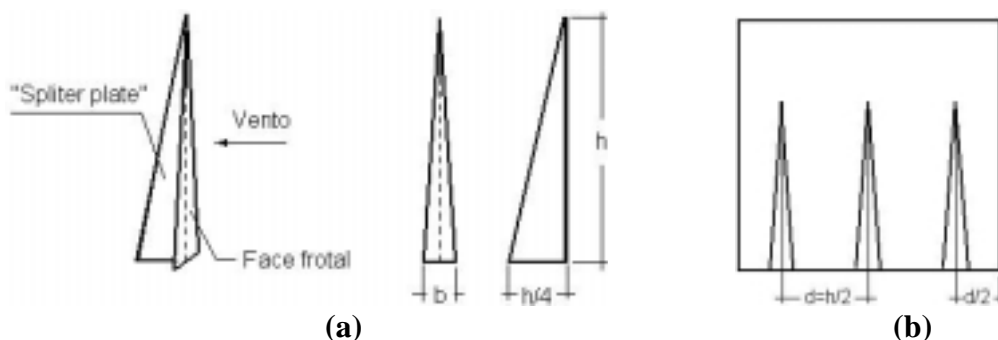


Figura 2 (a) Características geométricas de uma *spire* e (b) vista frontal da seção de testes com as *spires* instaladas

As dimensões das *spires* (vide Fig. 2a) dependem do tipo de camada limite que se quer e das dimensões do túnel (vide Fig. 1). A altura das *spires* (h) requeridas para a formação da camada limite deve levar em consideração a eq. (1). Esta relação é obtida a partir da recomendação, encontrada no trabalho de Irwin (1981), de que a distância entre uma *spire* e outra (d) deve possuir a metade da altura (ver figs. 2b). Desta forma,

considerando-se que a seção de testes do túnel tem largura E e que n *spires* são instaladas, obtém-se

$$h = \frac{2.E}{n} \quad (1)$$

A relação entre h e δ é dada pela seguinte relação empírica (vide Irwin, 1981):

$$h = 1,39 \left(\frac{\delta}{1 + \frac{\alpha}{2}} \right) \quad (2)$$

A largura b (Fig. 2 a) é função da altura do *spires* (h), da relação H/ δ e do expoente α , conforme pode ser visto nas equações apresentadas por Irwin (1981).

A câmara de ensaios do túnel de vento usado neste trabalho tem seção transversal quadrada, com lado igual a 460 mm e comprimento de 1200 mm. A velocidade pode ser variada na faixa entre 8 e 30 m/s e o nível de turbulência é de 0,5% para a máxima velocidade.

Considerando-se as características do túnel de vento e os valores para as alturas da falésia no CLA e da camada limite atmosférica sobre a superfície do oceano, discutidos anteriormente, adotou-se um fator de escala de 1:1000 para a confecção do modelo. Neste caso, a espessura da camada limite no interior do túnel de vento deve ter aproximadamente 280 mm de espessura.

Recorrendo-se a eq. (1), e considerando-se os valores para E e H apresentados acima, verifica-se que o número de *spires* (n) deve ser maior que 2. A eq. (2) permite a determinação da altura (h) das *spires*, a qual está relacionada com a espessura da camada limite (δ). Desta forma, considerando-se $\alpha = 0,15$, e variando-se o número de *spires* que devem ser instalados no túnel de vento, obtém-se os resultados apresentados na tabela 1.

Tabela 1- Valores possíveis para h e δ em função do número de *spires* (n)

N	h (mm)	δ (mm)
3	307,7	237
4	230,0	178

Vê-se que para n=3 o valor de δ mais se aproxima dos 280mm. Utilizando as equações apresentadas por Irwin (1981), obtém-se o valor da largura (b) da base das *spires*. Desta forma, três *spires*, com dimensões h=307,7 mm e b=32,6 mm, são utilizadas, neste trabalho, para a geração do perfil de velocidade requerido.

Segundo Irwin (1981), a camada limite estará bem formada a uma distância 6.h das *spires* que corresponde a 1840mm. Como a seção de testes apresenta um comprimento de 1200mm, foi necessário fazer um prolongamento da mesma.

O piso do túnel não é capaz de dar a contribuição de arrasto necessário para o ajuste da parte inferior do perfil da camada limite. Assim, deve-se modificar a superfície junto ao piso, de modo a incrementar esse arrasto. Normalmente utilizam-se paralelepípedos que introduzem uma rugosidade para produzir arrasto. Neste caso, pode-se aplicar a eq.

(3)

$$\frac{\tau}{\delta} = \exp\left\{\frac{2}{3} \ln\left(\frac{D}{\delta}\right) - 0,116 \left[\left(\frac{2}{C_f}\right) + 2,05\right]^{\frac{1}{2}}\right\} \quad (3)$$

onde τ é a altura do paralelepípedo, D a distância entre eles e C_f é o coeficiente de fricção, que é relacionado com o parâmetro α através da eq. (4).

$$C_f = 0,136 \cdot \left(\frac{\alpha}{\alpha + 1}\right)^2 \quad (4)$$

Entretanto, a eq. (3) é válida apenas no intervalo $30 < \frac{\delta \cdot D^2}{\tau^3} < 2000$. Neste caso, como $\alpha = 0,15$, obtém-se através da eq. (4) que $C_f = 2,31 \cdot 10^{-3}$. Variando o parâmetro D entre 10 e 200 mm obtém-se valores de τ na faixa entre 0,85 e 6,3 mm, utilizando-se a eq. (3). Para estes valores obtém-se $28.334 < \frac{\delta \cdot D^2}{\tau^3} < 28.474$. Fica claro que a equação

(3) não é válida para os valores de α e δ requeridos no presente trabalho. Desta maneira, o uso de paralelepípedos tornou-se inviável. Optou-se por usar um tapete rugoso, mais especificamente uma manta de bidim, usada na confecção de endredons (vide fig. 4), a qual é fixada na superfície inferior da seção de testes prolongada.

Para se medir o perfil de velocidade e a intensidade de turbulência utilizou-se um anemômetro de fio quente, cuja sonda foi instalada em um sistema de posicionamento de três eixos, que permite realizar posicionamentos com resolução de 0,1 mm. O sinal do anemômetro, depois de linearizado, foi enviado para um sistema de aquisição de dados, o qual determina os valores médio e *rms* da velocidade em cada ponto do perfil.

A análise de incerteza foi realizada através da metodologia proposta por **Kline e McClintock (1953)**. **Uma incerteza de 0.6% foi obtida para a velocidade adimensional e de 1% para o número de Reynolds.**

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

As *spires* sozinhas já produzem um perfil bastante próximo daquele para o qual ela foi projetada, sendo que a rugosidade serve como um ajuste. A rugosidade tende a aumentar o valor de α , pois a mesma oferece resistência ao escoamento próximo ao solo. Portanto α deve apresentar um valor menor que 0,15 para o caso das *spires* com ausência de rugosidade. Este foi o caso, conforme pode-se verificar na Fig. 3, na qual é apresentado o perfil de velocidades obtido em uma posição localizada à 6h das *spires*, com ausência de rugosidade. Considerando a região próxima ao solo, o perfil desejado ($\alpha=0,15$) possui valores menores de velocidade, A outra curva contínua representa o perfil que melhor se ajustou aos resultados ($\alpha=0,11$) e os símbolos são os resultados experimentais. Pode ser notado que a partir de aproximadamente 70mm de altura, os resultados experimentais concordaram bem com os requeridos. No entanto, para alturas inferiores, os valores experimentais de velocidade se mostraram acima daqueles requeridos, mostrando a necessidade de rugosidade.

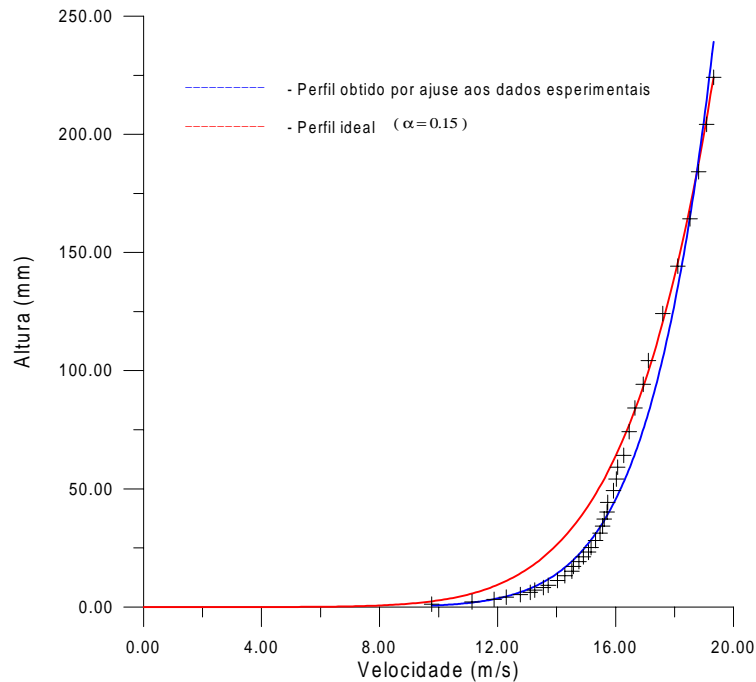


Figura 3 Perfil de velocidade média à 6h das *spires*, com ausência de rugosidade

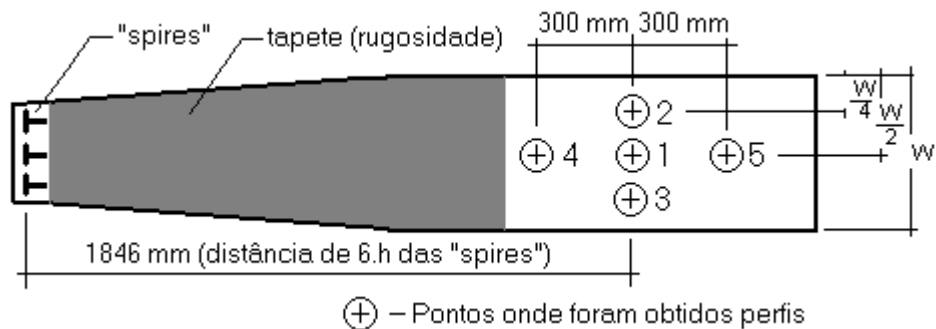


Figura 4- Superfície inferior da seção de testes e definição das posições de medidas ($W=440$ mm)

Para se analisar o escoamento produzido pelas *spires*, foram obtidos cinco perfis de velocidade com ausência de rugosidade no piso. Um destes perfis foi obtido no centro da seção de testes à uma distância 6.h das *spires*. Os perfis de velocidade nas posições 1, 2 e 3 (vide Fig. 4) foram obtidos para verificar a bidimensionalidade do escoamento gerado pelas 3 *spires*. Os perfis medidos nas posições 1, 4 e 5 foram usados para verificar se o escoamento sofre alterações significativas ao longo da direção longitudinal. Os resultados desta análise mostraram que o perfil de camada limite se manteve praticamente inalterado desde a posição 4 até a 5. Já a medição feita nos pontos 1, 2 e 3 evidenciou uma pequena discrepância (menor que 2% da velocidade máxima), a qual, na prática, pode ser desconsiderada.

Para encontrar a rugosidade ideal (comprimento ideal do tapete) seguiu-se a seguinte metodologia:

- Primeiramente cobriu-se 1570mm do piso do túnel (a partir das *spires*) com o tapete rugoso, mencionado anteriormente, e fez-se a obtenção de um perfil à distância de 6.h das *spires*. O valor de α obtido foi por volta de 0,25, bem maior do que o pretendido, indicando a presença de muita rugosidade.

- Fez-se então cortes no tapete (para diminuir seu comprimento e conseqüentemente a rugosidade) seguidos da obtenção de perfis, até chegar no comprimento de tapete que fornecia a rugosidade ideal, de modo a produzir o perfil desejado ($\alpha=0,15$).

Os resultados da metodologia precedente estão mostrados na tabela 2, onde pode-se verificar que um comprimento de 79 cm foi requerido para o ajuste do perfil de velocidades deste trabalho. As informações da tabela 2 também podem ser usadas para determinar o comprimento do tapete rugoso requerido para ajustar o perfil de velocidades da camada limite atmosférica que ocorre sobre outros tipos de superfícies (terrenos).

Tabela 2- Comprimentos do tapete de bidim e respectivos valores de α

Comprimento (mm)	1570	1390	1000	790	0
α	0,26	0,20	0,17	0,15	0,11

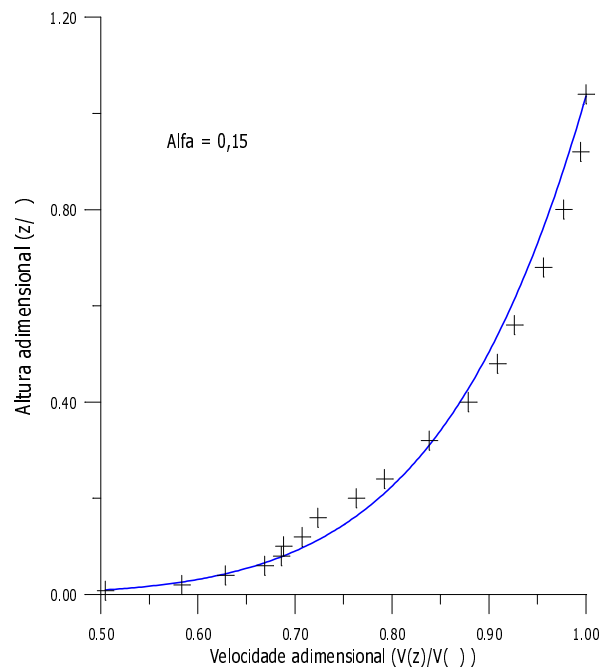


Figura 5 - Perfil de velocidade média obtido na posição 1, para $Re = 3,04.10^5$

Após encontrada a rugosidade ideal, foram feitos ensaios para obter as características do escoamento. Foram obtidos perfis de velocidade média e intensidade de turbulência nas posições 1, 4 e 5 (vide figura 4). Ainda foram obtidos perfis na posição 1 para três diferentes velocidades (diferentes números de Reynolds) do escoamento, para ver se o perfil se modifica com o número de Reynolds.

Os resultados destes experimentos são mostrados nas Figs. 5 e 6 e nas tabelas 3 e 4. Pode-se observar que a curva com $\alpha=0,15$ se ajusta bem aos resultados experimentais (Fig. 5) e que a intensidade de turbulência, I^* , (Fig. 6) é caracterizada por um valor aproximadamente constante até uma altura adimensional de 0,25. O decréscimo de I^* com a altura esta ligado a dois fatores: (i) a forma das *spires*, que causam menor perturbação na parte superior, devido ao menor bloqueio que acarretam no escoamento e

(ii) a presença do tapete rugoso, que incrementa o arrasto e, também, o nível de turbulência na região mais próxima da superfície inferior da seção de testes.

Os resultados apresentados na tabela 3 mostram que o expoente α e a intensidade de turbulência (I^*) decaem ligeiramente ao longo da direção longitudinal do escoamento. Esta observação mostra que sem o tapete rugoso o escoamento médio se modifica, tendendo a um escoamento com perfil uniforme e, como esperado, a turbulência gerada no tapete sofre um decaimento.

A variação do número de Reynolds praticamente não acarreta alterações nos valores de α e I^* , como pode ser observado na tabela 4. Pode-se verificar somente uma pequena queda no valor de α , a qual pode estar associada à variação do coeficiente de fricção (C_f), do tapete rugoso, o qual, normalmente sofre um decréscimo com o aumento do Re .

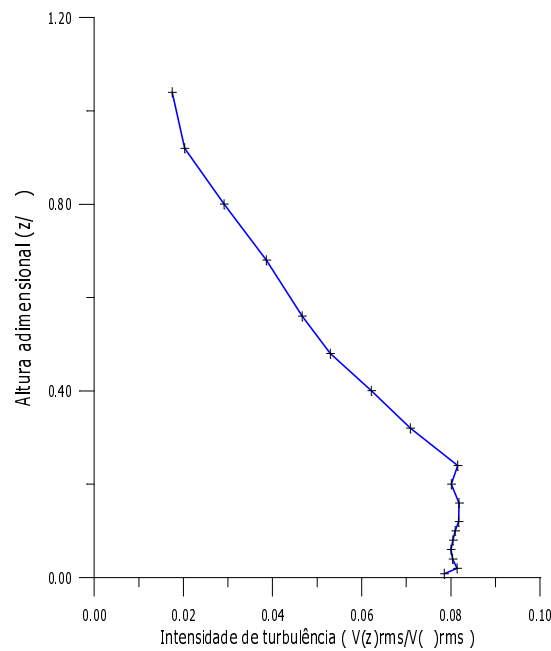


Figura 6: Perfil de intensidade de turbulência obtido na posição 1, para $Re = 3,04 \cdot 10^5$

Tabela 3 - Valores de α e I^* em função da posição

Posição (vide Fig. 4)	α	I^*	Reynolds
4	0,15	0,087	$3,04 \cdot 10^5$
1	0,15	0,080	$3,04 \cdot 10^5$
5	0,14	0,075	$3,04 \cdot 10^5$

Tabela 4 - Valores de α e I^* em função do número de Reynolds

Posição (vide Fig. 4)	α	I^*	Reynolds
1	0,15	0,080	$2,09 \cdot 10^5$
1	0,15	0,080	$3,04 \cdot 10^5$
1	0,14	0,082	$5,00 \cdot 10^5$

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A técnica que utiliza *spires* foi aplicada com sucesso para o desenvolvimento de um escoamento com perfil de velocidade tipo camada limite atmosférica, para o caso de um túnel de vento com pequenas dimensões.

O perfil de intensidade de turbulência não ficou uniforme como seria desejável, conforme relatado na literatura. Para melhorar esta característica, pode-se utilizar uma tela fina uniforme, posicionada à montante das *spires*, a qual introduziria uma turbulência uniforme no escoamento.

Os resultados dos experimentos para se encontrar a rugosidade ideal para este trabalho, podem ser usados para se obter outros tipos de perfil de velocidade, apropriados para o modelamento do escoamento atmosférico sobre outros tipos de terrenos. Ainda com relação a este aspecto, os valores de α e I^* parecem estar ligados com o tipo de rugosidade do tapete colocado no piso da seção de testes. Desta forma, experimentos adicionais com tapetes diferentes, poderiam fornecer informações importantes para se obter qualquer tipo de combinação, requerida para os parâmetros mencionados acima.

Por fim, como mencionado anteriormente, esta pesquisa será continuada com a instalação de um degrau na seção de testes e com o estudo do escoamento na parte superior do mesmo.

5. AGRADECIMENTOS

À Fundação de Ampara a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelos recursos disponibilizados para a aquisição de equipamentos, através dos processos 95/05569-1 e 96/12147-9.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Blesmann, J., 1973, “Simulação da estrutura do vento natural em um túnel aerodinâmico”, Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, SP.
- Irwin, H.P.A.H., 1981, “The design of *spires* for wind simulation”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 7, pp. 361-366.
- Kline, S. J. & McClintock, F. A., 1953, “Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments”, *Mechanical Engineering*.
- Owen, P.R. and Zienkiewicz, H.K., 1957, “The production of uniform shear flow in a wind tunnel”, *J. Fluid Mech.*, August, pp 521-531.