



Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Avaliação de Escoamento em Túnel de Vento
Bolsista: Thiago Santos de Paula Barros
Orientador(a): Maria Luisa Collucci da Costa Reis
Período a que se refere o relatório: Dezembro de 2015 a Agosto 2016

Resumo

Uma campanha de ensaios está sendo realizada para avaliar a qualidade do escoamento do túnel de vento subsônico número 2 da Divisão de Aerodinâmica do Instituto de Aeronáutica e Espaço, IAE/ALA/TA-2. A campanha inclui medição de pressão, velocidade, turbulência e camada limite. Neste trabalho são apresentados os resultados de distribuição de velocidade, V , e de coeficiente de pressão, C_p , na região central da seção de ensaios do túnel. Os parâmetros de escoamento medidos são temperatura, T , pressão estática local, p , pressão total local, p_0 , e pressões dinâmica, q_∞ , e estática, p_∞ , do escoamento não perturbado. Dois *rakes* constituídos por tubos com portas de pressão total e de pressão estática foram utilizados nos ensaios. As condições de escoamento livre foram medidas por tubos de Pitot posicionados na parede superior da entrada da seção de ensaios. As incertezas associadas aos parâmetros medidos correspondem ao desvio padrão da média dos sinais temporais obtidos durante os ensaios e as incertezas associadas aos parâmetros estimados são avaliadas a partir da lei de propagação de incertezas. Observou-se a ocorrência de gradientes de pressão e de velocidade na região analisada.

1. Introdução

Túneis de vento são instalações aerodinâmicas projetadas de modo que seu escoamento seja uniforme e livre de gradientes de pressão e turbulência. Esta condição ideal de projeto não ocorre, fazendo com que os aerodinamicistas que trabalham no túnel planejem realizem, periodicamente, experimentos para calibrar o escoamento.

O TA-2 é um túnel de vento subsônico de circuito fechado, onde o número de Mach atinge valor máximo de aproximadamente 0.35. A seção de ensaios possui 2.10 m de altura, 3.00 m de largura e 3.20 m de comprimento. Foi construído nos anos 1950 e está localizado na Divisão de Aerodinâmica do Instituto de Aeronáutica e Espaço, IAE/ALA/TA-2.

Para o presente estudo, foram utilizados dois *rakes* para a medição de pressão estática e de pressão total locais. Condições de escoamento livre foram medidos por tubos de Pitot localizados na entrada da seção de ensaios. Os resultados apresentados neste relatório são valores do coeficiente de pressão, C_P , e de velocidade, V . Com base nestas informações, os experimentalistas do túnel TA-2 podem propor modificações no circuito aerodinâmico para a obtenção de uniformidade de escoamento.

2. Materiais e métodos

Os materiais utilizados foram dois *rakes*, denominados *rake 97* and *rake 15*. Os nomes foram dados de acordo com o número de tomadas de pressão que cada um possui.

O *rake 97* possui 97 tubos. Os tubos identificados pelos números de 1 a 81 e pelas letras A até J medem pressão total local. Os tubos que medem pressão estática local são numerados de 82 a 87. Neste *rake*, as tomadas de pressão estática e de pressão total não estão posicionadas no mesmo tubo, sendo necessária uma correspondência entre as tomadas (Tabela 1). O *rake 15* é constituído por 15 tubos de Pitot (Fig. 1b).

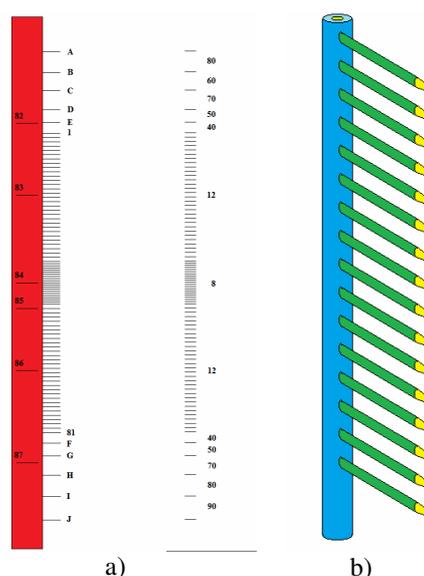


Fig. 1. *Rakes*: 97 (a) e 15 (b)

Tabela 1. Relação entre tomadas de pressão estática e total de acordo com a proximidade dos tubos do rake 97.

Tubos de pressão estática p	Tubos de pressão total p_0
82	A até E
83	1 até 30
84	31 até 51
85	52 até 66
86	67 até 81
87	F até J

A seção de ensaios foi mapeada em 25 posições (Fig. 2a). Os rakes 15 e 97 posicionados em P12 e P14, respectivamente, são mostrados na Fig. 2b.

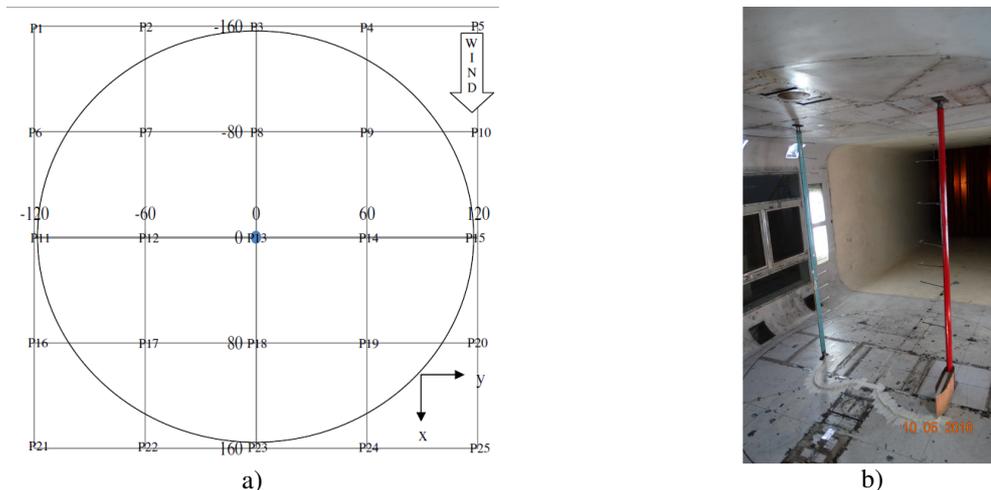


Fig. 2. a) Esquema representativo do chão da seção de ensaios para posicionamento dos rakes. Unidade em milímetro. b) Rakes 15 (azul) e 97 (vermelho) posicionados em P12 e P14, respectivamente.

O rake 97 foi ligado a 4 sensores de pressão do tipo *scanner*, contituídos de 32 canais cada, com faixa de medição de 1 psi (6894 Pa) e o rake 15 foi ligado a 2 sensores de pressão, um dedicado à pressão total com faixa de medição de 1 psi (6.894 Pa) e outro a pressão estática de faixa de medição 10 polH₂O (2.490 Pa). Ao todo, durante os ensaios, trabalhavam 6 sensores de pressão.

A calibração foi realizada na seção de ensaios do TA-2 com o equipamento Druck, dpi 610, de 700 mbar (70.000 Pa).

A aquisição de dados foi realizada a uma taxa de 1.000 Hz e se inicia a partir da leitura simultânea do primeiro canal de cada um dos 6 *scanners* de pressão. Essa leitura é realizada

10 vezes consecutivas e após esse processo passa pelo segundo canal e vai até o trigésimo segundo formando um ciclo, que se repete por 80 vezes para completar uma corrida.

2.1. Modelagem Matemática

A equação de Bernoulli para um fluido incompressível foi usada para calcular a velocidade do ar, V (Anderson, 2001):

$$p_0 = p + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (1)$$

que resulta em:

$$V = \left[\frac{2(p_{0local} - p_{local})}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Na Eq. 2, p_{0local} é a pressão total e p_{local} é a pressão estática, ambas medidas em cada *rake*.

A massa específica do ar é calculada por:

$$\rho = \frac{P_\infty}{RT} \quad (3)$$

onde:

p_∞ é a pressão estática medida pelo tubo de Pitot localizado no início da seção de ensaios;

R é a constante de gases ideais 287 J/(kg)(K); e

T é a temperatura em Kelvin.

O coeficiente de pressão é definido por:

$$C_p \equiv \frac{p - p_\infty}{q_\infty} \quad (4)$$

onde p é a pressão estática local e p_∞ e q_∞ são parâmetros de escoamento não perturbado medidos no início da seção de ensaios. O numerador da Eq. 4 é medido por um sensor diferencial neste caso, resultando na expressão de C_p igual a:

$$C_p = \frac{\Delta p}{q_\infty} \quad (5)$$

2.2. Propagação de incerteza

As incertezas do coeficiente de pressão, u_{CP} , e velocidade, u_V , são calculadas utilizando a lei de propagação de incertezas (JCGM 100, 2008). Para o caso de variáveis independentes, a incerteza padrão combinada é a raiz quadrada positiva de:

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (6)$$

onde y é a grandeza de saída, o mensurando (JCGM 200, 2012), e x_i são as grandezas de entrada.

Aplicando Eq. 6 nas Eqs. 2, 3 e 5, resulta em:

$$u_V^2 = \left(\frac{1}{\rho} \left[\frac{2(p_{0local} - p_{local})}{\rho} \right]^{-\frac{1}{2}} \right)^2 u_{p_{0local}}^2 + \left(\frac{-1}{\rho} \left[\frac{2(p_{0local} - p_{local})}{\rho} \right]^{-\frac{1}{2}} \right)^2 u_{p_{local}}^2 + \quad (7)$$

$$\left(\frac{(p_{local} - p_{0local})}{\rho^2} \left[\frac{2(p_{0local} - p_{local})}{\rho} \right]^{-\frac{1}{2}} \right)^2 u_{\rho}^2$$

$$u_{\rho}^2 = \left(\frac{1}{RT} \right)^2 u_{p_{\infty}}^2 + \left(\frac{-p_{\infty}}{RT^2} \right)^2 u_T^2 \quad (8)$$

$$u_{C_p}^2 = \left(\frac{1}{q_{\infty}} \right)^2 u_{\Delta p}^2 + \left(\frac{-\Delta p}{q_{\infty}^2} \right)^2 u_{q_{\infty}}^2 \quad (9)$$

3. Resultados

De acordo com os ensaios realizados foi possível dar início ao estudo de mapeamento da seção de ensaios de túnel de vento TA-2. Foram ensaiadas várias faixas de velocidade de escoamento, porém serão apresentados neste trabalho apenas os resultados referentes à velocidade nominal de 70 m/s.

3.1. Distribuição de velocidade

A velocidade foi calculada com base na Eq. 2 e a incerteza foi calculada a partir da Eq. 7. Foi necessário o cálculo da Eq. 8 para que a incerteza da massa específica fosse incluída na Eq. 7. Os *rakes* 15 e 97 foram posicionados em P12 e P14, respectivamente.

Podemos analisar a distribuição de velocidade na Fig. 3 onde o eixo das ordenadas corresponde à altura z (mm) em relação ao chão da seção de ensaios e o eixo das abscissas aos valores de velocidade (m/s). As barras de incerteza associadas aos dados também estão apresentadas.

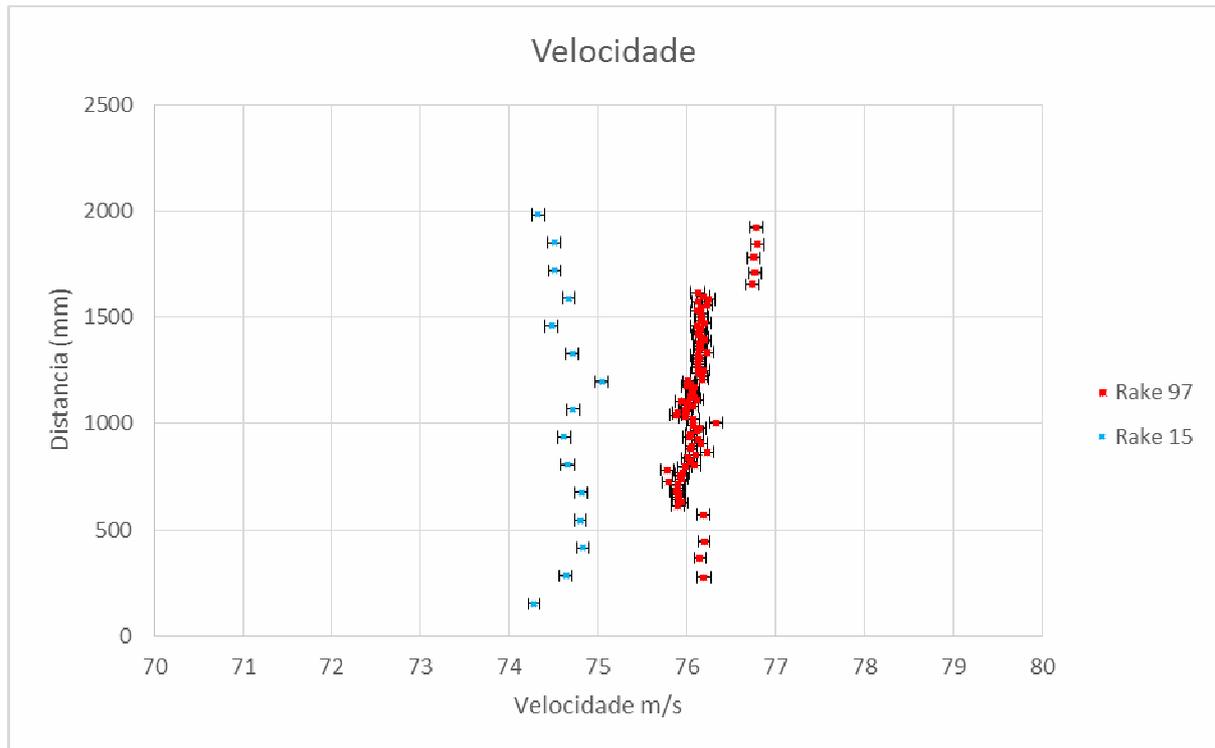


Fig. 3 A velocidade do escoamento nas posições P12 (*rake* 15) e P14 (*rake* 97).

Foi adicionada uma linha de tendência ao gráfico da velocidade.

Na posição P14 a velocidade é expressa pela equação:

$$V = 0,0004z + 75,711$$

enquanto que na posição P12 é:

$$V = - 8 \times 10^{-5}z + 74,727$$

3.2. Coeficiente de Pressão

As distribuições do coeficiente de pressão nas posições P12 (*rake* 15) e P14 (*rake* 97) são apresentadas na Fig.4. Os valores de C_p foram calculados a partir da Eq. 5.

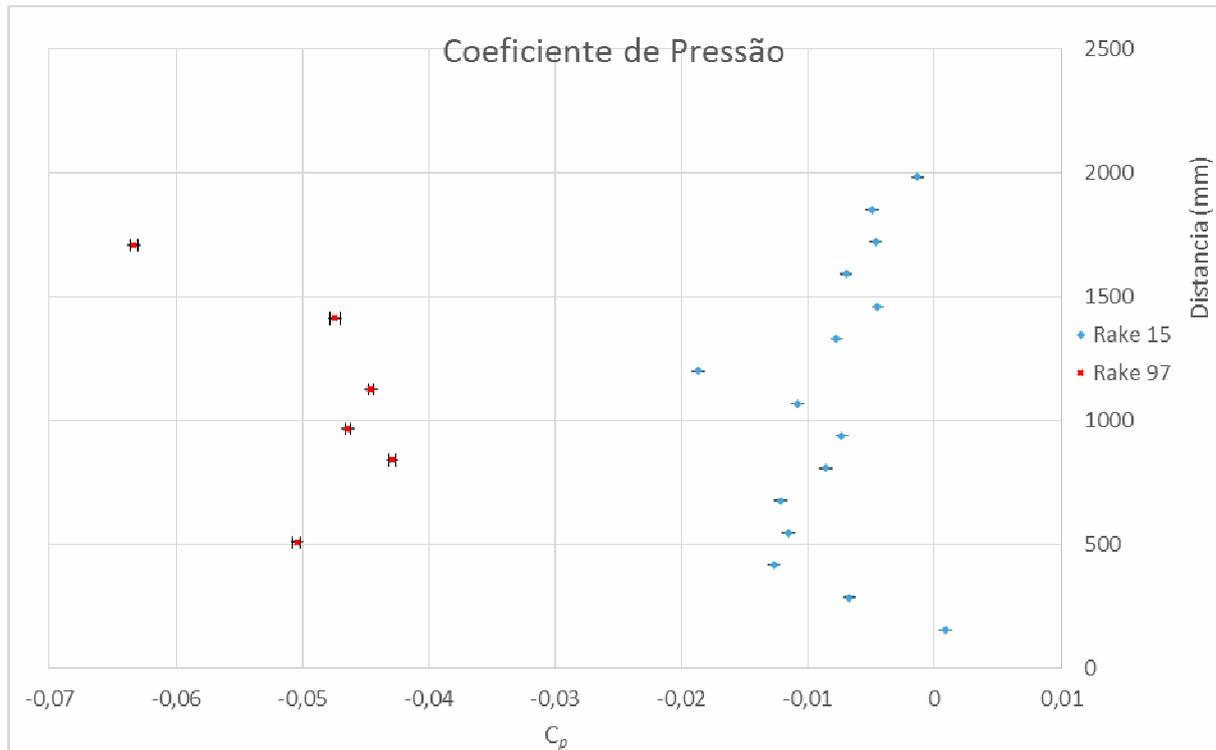


Fig. 4 Coeficiente de Pressão nas posições P12 e P14.

A equação de reta para o coeficiente de pressão da posição P14 é:

$$C_p = -1 \times 10^{-5} z - 0,038$$

Na posição P12 a equação da reta do coeficiente de pressão é:

$$C_p = 2 \times 10^{-6} z - 0,0098$$

4. Conclusões

Está sendo desenvolvida uma metodologia para avaliar a qualidade do escoamento da seção de ensaios do túnel de vento subsônico TA-2.

Até o presente momento, somente a região correspondente à região central foi avaliada.

Os resultados preliminares revelaram a presença de gradientes de velocidade e de coeficiente de pressão.

As distribuições apresentadas nas Figs. 3 e 4 foram consideradas discrepantes e deverão ser investigadas em termos de instrumentação e metodologia de aquisição e redução de dados.

Planeja-se em ensaios futuros intercambiar as posições dos *rakes* para comparação de repetibilidade de medição. Serão repetidos ensaios com os *rakes* na posição vertical, de forma



que cada *rake* será fixado de modo invertido. Ensaios com a configuração na direção horizontal também serão realizados.

5. Divulgação dos Resultados

Um artigo relacionado a esta pesquisa foi submetido ao 16th *Brazilian of Thermal Sciences and Engineering*, ENCIT 2016, que será realizado na cidade de Vitória, ES, no período de 7 a 10 de Novembro de 2016. Título: *Flow quality analysis of the TA-2 wind tunnel test section*. Autores: Thiago Santos de Paula Barros, Maria Luisa Collucci da Costa Reis, Marcos da Silva e Souza e Daniel Simão Alves de Lima.

Referências

- Anderson Jr., J.D., 2001. *Fundamentals of Aerodynamics*. John Wiley & Sons, New York.
- Barlow, J.B., Rae, W.H., Pope, A.P, 1999. *Low-Speed Wind Tunnel Testing*. John Wiley & Sons, New York.
- JCGM 100: 2008. *Evaluation of measurement data-Guide to the expression of uncertainty in measurement*. BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML. September, 2008.
- JCGM 200: 2012. *International vocabulary of metrology-Basic and general concepts and associated terms (VIM)*. BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML. 2012.