



## Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Análise do escoamento no túnel de vento TA-2  
Bolsista: Thiago Santos de Paula Barros  
Orientador(a): Maria Luísa Collucci da Costa Reis  
Período a que se refere o relatório: Agosto de 2016 a Julho de 2017

### 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. Relatórios anteriores apresentaram resultados de distribuição de velocidade,  $V$ , e de coeficiente de pressão,  $C_p$ , na região central da seção de ensaios do túnel. No presente estudo serão apresentados resultados de intensidade de turbulência do escoamento do TA-2 em um ponto único situado no centro da seção de ensaios. O instrumento utilizado na campanha é um anemômetro de temperatura constante fabricado pela DANTEC®. A instrumentação foi calibrada anteriormente em ambiente controlado usando instrumentação própria do fabricante. Para este relatório foi feito um pré-ensaio com velocidade de escoamento nominal de 30 m/s. A intensidade de turbulência encontrada no centro da seção de ensaios do TA-2 foi 0,60 %.

### 1. Introdução

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

Os resultados de distribuição de velocidade na seção central transversal do túnel de vento subsônico TA-2 foram apresentados no relatório parcial referente ao período Ago/2016-

Jan/2017 e no artigo apresentado no ENCIT (Barros *et al*, 2016). Uma sumarização do resultado é apresentado na Figura 1.

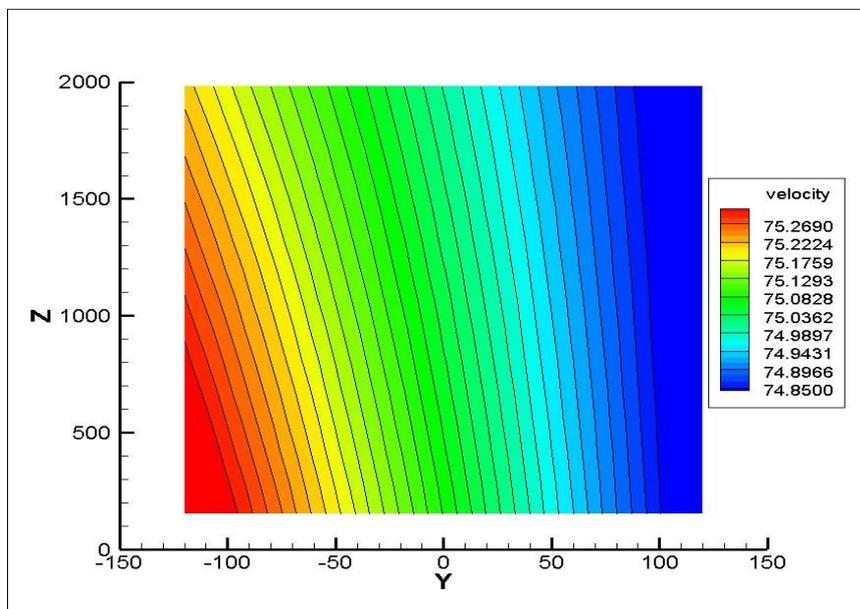


Figura 1. Distribuição de velocidades numa seção transversal da seção de ensaios do TA-2.

Este relatório é referente aos ensaios de análise de turbulência. Para este estudo de intensidade de turbulência, foi utilizada a técnica de anemometria de fio quente. A anemometria térmica é empregada quando se deseja medir velocidades que variam rapidamente no tempo. O princípio físico é a resistividade elétrica do material sensor dependente da temperatura do fluido em movimento.

Conhecer a intensidade de turbulência do escoamento do túnel é importante para os ensaios de qualquer objeto que seja ensaiado, pois conhecendo essas características do túnel pode-se ter um maior controle dos fenômenos aerodinâmicos que possam vir a ocorrer durante os ensaios, e consequentemente, minimizar e/ou corrigir seus efeitos.

## 2. Materiais e métodos

Existe uma gama de sondas de fio quente disponíveis no mercado para avaliação de turbulência de escoamento, disponíveis no website do fabricante (Dantec Dynamics). Para o

regime de velocidade estudado, a sonda de fibra quente utilizada foi o modelo DANTEC® R5501 (Figura 2), que opera no modo temperatura constante. Esta instrumentação estava disponível no TA-2 e teve-se o objetivo de avaliar o nível de confiabilidade metrológica dos ensaios quando se utiliza este modelo.

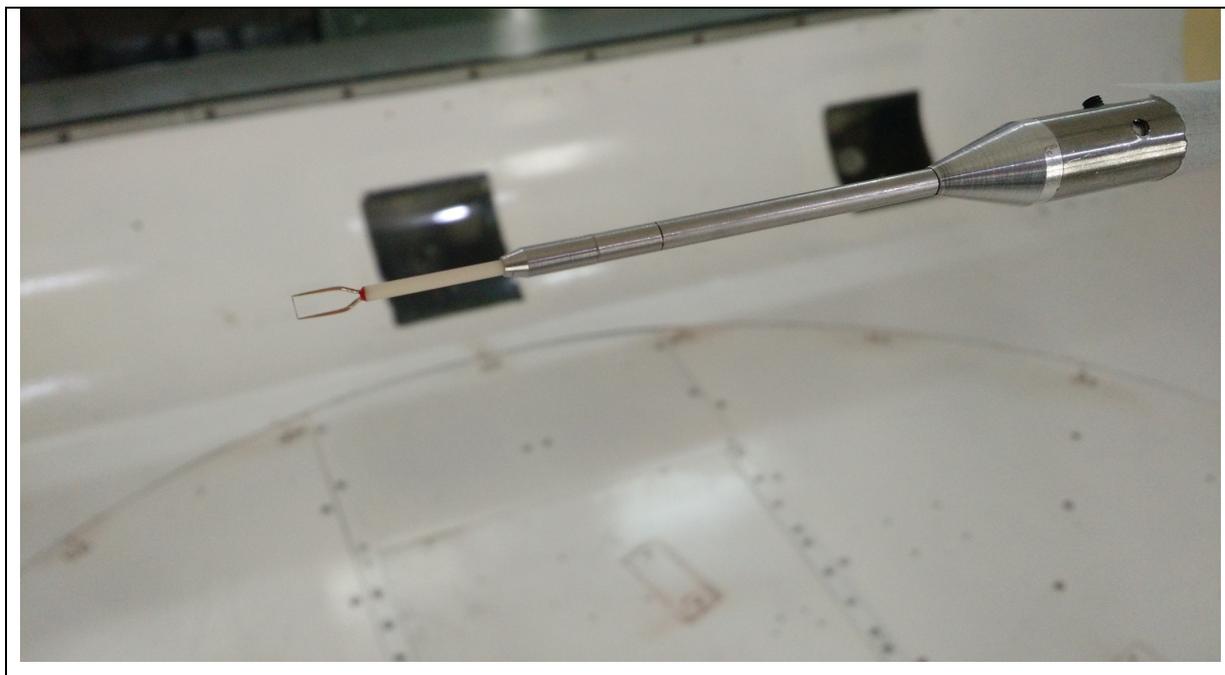


Figura 2. Sonda de fibra quente R5501 DANTEC®.

O fio quente foi calibrado anteriormente aos ensaios, num sistema de calibração dedicado (Figura 3). Este sistema consiste de um calibrador onde foi posicionada a sonda (1); este calibrador é ligado a um compressor situado na sala de máquinas da Divisão. O calibrador produz um escoamento em velocidade controlada na sonda de acordo com a programação estabelecida no software StreamWare. O calibrador e a sonda são ligados no módulo de calibração tipo 90N10 (2).



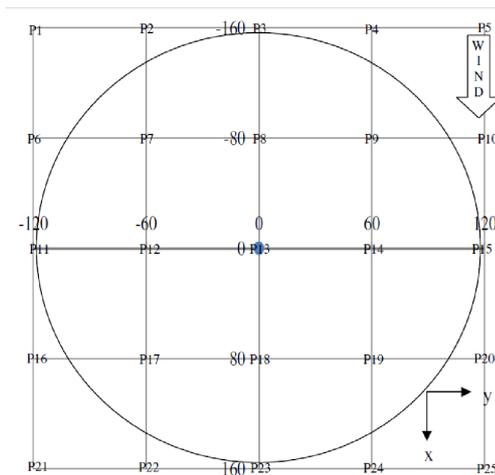
Figura 3. Sistema de calibração de fio quente.

O fio quente foi fixado em um suporte e posicionado no centro da seção de ensaios do túnel de vento TA-2 (Figura 4a). O centro da seção de ensaios corresponde à localização  $(x, y) = (0, 0)$ , identificada como P13 na Figura 4b. Para o presente estudo, a sonda está posicionada a 1450 mm do chão.

A aquisição de dados foi realizada a uma taxa de 1.000 Hz, tendo 5 tomadas por velocidade com 15.000 amostras.



a)



b)

Figura 4. a) Sonda posicionada no centro da seção de ensaios. b) esquema representativo das posições no chão da seção de ensaios.

### 3. Modelagem Matemática

O princípio do anemômetro é baseado na transferência de calor entre o sensor (fibra) e o fluido. Esta taxa de transferência de calor irá depender da velocidade do fluido, da massa específica, da condutividade térmica, do coeficiente de expansão térmica e do calor específico e também do diâmetro e área superficial do fio.

A potência elétrica fornecida ao fio é função do coeficiente de transferência de calor e da diferença de temperatura entre o fio e o escoamento. Em um trabalho experimental e teórico, Jorgensen (2002) estabelece que para um fio cilíndrico infinitamente longo, de acordo com a lei de King, a transferência de calor convectiva pode ser expressa na forma de uma relação entre o número de Nusselt e o número de Reynolds:

$$Nu = A + B Re^{0.5} \quad (1)$$

onde  $A$  e  $B$  são constantes empíricas de calibração. Como a potência elétrica fornecida ao fio é uma função da temperatura e da velocidade do escoamento podemos escrever:

$$E^2 = A + BU^{0.5} \quad (2)$$

onde  $E$  é a tensão e  $U$  a velocidade. No caso de fios de dimensão finita, como é o caso de uma sonda de fio-quente, a transferência de calor por condução nas extremidades do fio deve ser levada em consideração, assim como uma variação da lei de comportamento do número de Nusselt. Na prática isto é feito utilizando-se um coeficiente  $n$  na Eq. (2), ou seja:

$$E^2 = A + BU^n \quad (3)$$

O instrumento da DANTEC faz a calibração usando a Eq. (3) definindo as constantes  $A$ ,  $B$  e  $n$ . A partir destas constantes obtém-se valores de tensão e velocidade.

Os valores médios das velocidades aquisitadas em cada milésimo de segundo foram calculadas a partir da equação:

$$U_{mean} = \left( \frac{1}{N-1} \right) \sum_1^N U_i \quad (4)$$

e o desvio padrão a partir da equação:

$$U_{rms} = \left( \frac{1}{N-1} \sum_1^N (U_i - U_{mean})^2 \right)^{0,5} \quad (5)$$

A partir das equações (4) e (5) calcula-se a intensidade de turbulência:

$$Tu = \frac{U_{rms}}{U_{mean}} \quad (6)$$

## 4. Resultados

Neste trabalho serão apresentados os níveis de turbulência no regime de 30 m/s na região central da seção de ensaios do túnel de vento TA-2, a sonda está posicionada a 1.450 mm do chão da seção de ensaios.

### 4.1. Média da Velocidade

Os valores de velocidade médios nas 5 interações foram calculados tirando a média em cada instante, que equivale a 0,001 segundo; os dados foram adquiridos durante 15 segundos, resultando em 15.000 valores por interação. A média e desvio padrão de cada instante das 5 interações foram calculados a partir das Eqs. 4 e 5, respectivamente. A Figura 5 mostra a média das velocidades nas cinco interações, sendo o eixo das abscissas expresso em segundos e o eixo das ordenadas em m/s.

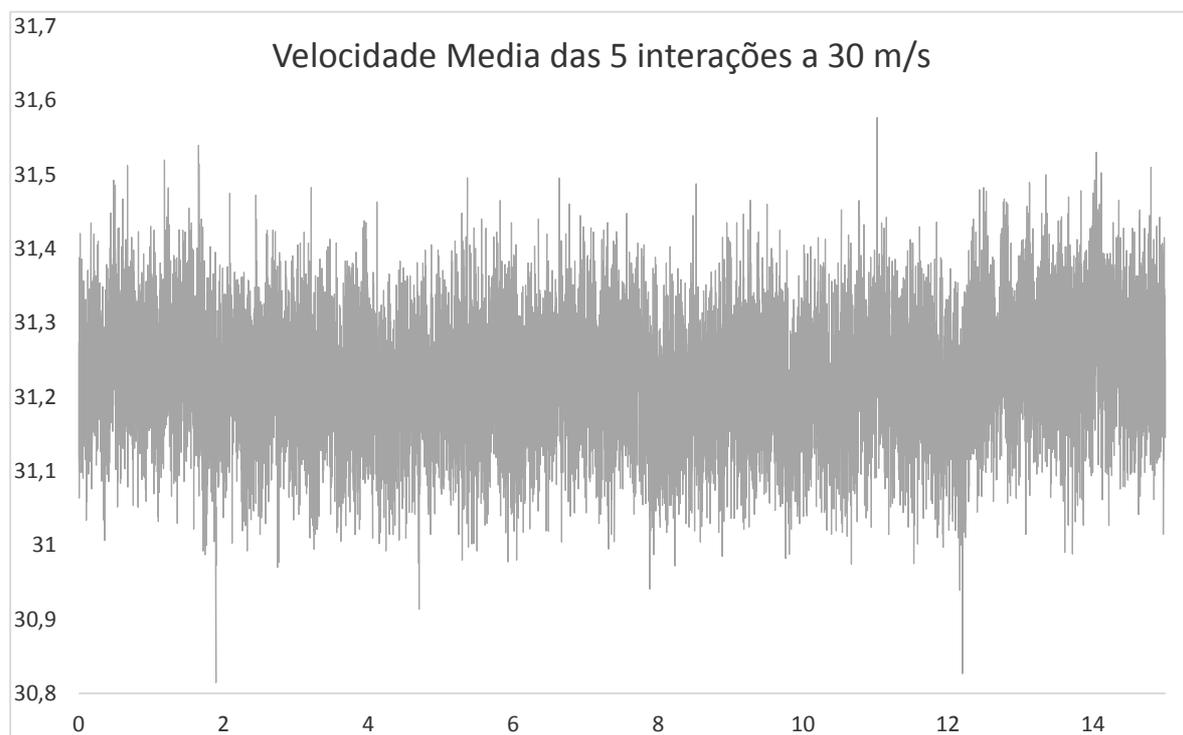


Figura 5. Gráfico da velocidade na posição P13.

#### 4.2. Intensidade de Turbulência

A intensidade de turbulência foi calculada a partir da Eq. 6. Os resultados obtidos no pré-ensaio são apresentados na Tabela 1.  $U_{mean}$  representa a velocidade média de cada corrida,  $U_{rms}$  o desvio padrão da velocidade e  $Tu$  a intensidade de turbulência.

Tabela 1. Velocidade Média, Desvio padrão da velocidade, Intensidade de turbulência.

	$U_{mean}$ (m/s)	$U_{rms}$ (m/s)	$Tu$ (%)
Corrida 1	31,259	0,182	0,583
Corrida 2	31,276	0,187	0,596
Corrida 3	31,231	0,184	0,590
Corrida 4	31,221	0,187	0,598
Corrida 5	31,144	0,180	0,579

O *National Research Council* do Canadá reporta valor de nível de turbulência igual a 0,14 % ([http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/solutions/facilities/wind\\_tunnel/2x3\\_metre.html](http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/solutions/facilities/wind_tunnel/2x3_metre.html)), para o túnel de vento de dimensões 2 m x 3m.



O túnel de vento F2 do Laboratório Aeroespacial Francês, ONERA, contruído para configuração de baixa turbulência, reporta nível de turbulência de 0,05 % (<http://windtunnel.onera.fr/f2-wind-tunnel>).

## 5. Próximas Etapas

O próximo passo para a pesquisa será fazer a análise das intensidades de turbulência usando uma calibração feita diretamente no TA-2 e análise nas demais regiões da seção de ensaios.

## 6. Conclusões

A intensidade de turbulência numa posição central da seção de ensaios do TA-2 foi avaliada. Este trabalho apresentou os resultados de um pré-ensaio constituído de cinco corridas, na velocidade de escoamento nominal 30 m/s. A sonda R5501 foi calibrada anteriormente aos ensaios na faixa de velocidades típicas do TA-2. Constatou-se que o valor de velocidade do túnel e o fornecido pela curva de calibração do sensor apresentaram boa correlação. A intensidade de turbulência  $Tu$  medida variou na faixa de 0,57 a 0,59. Por se tratar de um pré-ensaio, a confiabilidade metrológica dos resultados não pode ser confirmada. A campanha de ensaios completa deve englobar ensaios de repetibilidade para verificar a exatidão dos resultados. Estão previstos ensaios em outros regimes de velocidade e em outras posições da seção de ensaios.

## 7. Referências

Barros, T. S. P., Souza, M. S., Reis, M. L. C. C., Lima, D. S. A., Flow quality analysis of the TA-2 wind tunnel test section, 2016, Vitória, Proceedings of the 16<sup>th</sup> Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, 2016.

Dantec Dynamics. disponível em: <<https://www.dantecdynamics.com/hot-wire-and-hot-film-probes>>. Acesso em: jul 2017.



Jorgensen, F. E. How to measure turbulence with hot-wire anemometer, a practical guide.  
Dantec Dynamics, 2002.