



## Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Análise do escoamento no túnel de vento TA-2  
Bolsista: Ricardo Régis dos Santos  
Orientador(a): Maria Luísa Collucci da Costa Reis  
Período a que se refere o relatório: Setembro de 2017 a Agosto de 2018

### Resumo

A primeira fase da campanha de análise do escoamento do túnel de vento subsônico TA-2 do Instituto de Aeronáutica e Espaço foi concluída. Nesta campanha a distribuição de velocidade do escoamento em toda a seção de ensaios foi analisada, bem como o crescimento da camada limite no piso da seção central longitudinal. A caracterização do escoamento foi determinada usando um *rake* contendo 15 tubos de Pitot e para determinar o crescimento da camada limite foi usado um *rake* com 16 tubos tomadas de pressão. Parâmetros do escoamento livre foram medidos por dois tubos de Pitot posicionados na parede superior da entrada da seção de ensaios. Os regimes de escoamento referem-se à pressão dinâmica nominal de 50, 100, 200, 300, 400, 500 e 600 mmH<sub>2</sub>O. Os valores de pressão estática e pressão dinâmica apresentados são referentes às médias de cinco ensaios corridos e a incerteza associada aos parâmetros foram avaliados a partir da lei de propagação de incertezas. Os resultados apresentaram uma diminuição da velocidade do escoamento do início para o final da seção de ensaios e uma uniformização da velocidade na seção transversal central. O crescimento da camada limite foi de 29,9 mm no piso da seção longitudinal central da seção de ensaios.

### 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 [1], fazendo com que os aerodinamicistas que trabalham no túnel realizem, periodicamente, experimentos para calibrar o escoamento. Um banco de dados detalhado

pode ajudar a entender o comportamento do escoamento e pode ser usado para explicar resultados aerodinâmicos originados de testes de modelos e também pode revelar a necessidade de melhoria no circuito do túnel de vento. Nesse estudo a seção de ensaios foi mapeada com relação à velocidade do escoamento em 25 pontos distribuídos em 5 seções transversais com 5 pontos cada e em 15 pontos com relação à altura. Quanto ao crescimento da camada limite, foi considerado o piso da seção longitudinal central em 5 pontos a jusante do início da seção de ensaios. De acordo com [2], a camada limite tende a crescer ao longo de um corpo plano (Figura 1), portanto é esperado que a camada limite cresça da entrada para o final da seção de ensaios do TA-2.

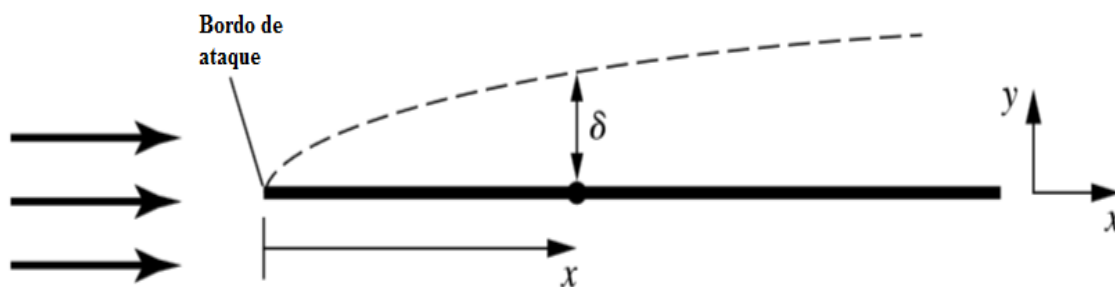


Figura 1. Crescimento da camada limite sobre uma placa plana [2].

## 2. Materiais e métodos

Os materiais utilizados foram dois *rakes*, chamados *Rake 15* e *rake 16*. Os nomes foram dados de acordo com o número de tomadas de pressão que cada um possui. Para a caracterização da velocidade do escoamento no interior da seção de ensaios foi utilizado o *Rake 15* com 15 tubos de Pitot nas posições 153, 283, 415, 545, 676, 806, 937, 1067, 1198, 1329, 1459, 1590, 1720, 1851 e 1982 mm a partir do piso (Figura 2).

O túnel de vento TA-2 possui uma seção de ensaios com 3,00 m de largura, 2,10 m de altura e 3,20 m de comprimento. Foi definido que o eixo *x* seria o comprimento, o eixo *y* a largura e o eixo *z* a altura. A seção de ensaios foi dividida em 5 seções transversais equidistantemente distribuídas ao longo do eixo *x* e cada uma dessas seções contém 5 pontos no eixo *y* gerando assim 25 posições de P1 até P25 (Figura 3).



Figura 2. *Rake* 15 com 15 tubos de Pitot para medição das velocidades na seção de ensaio.

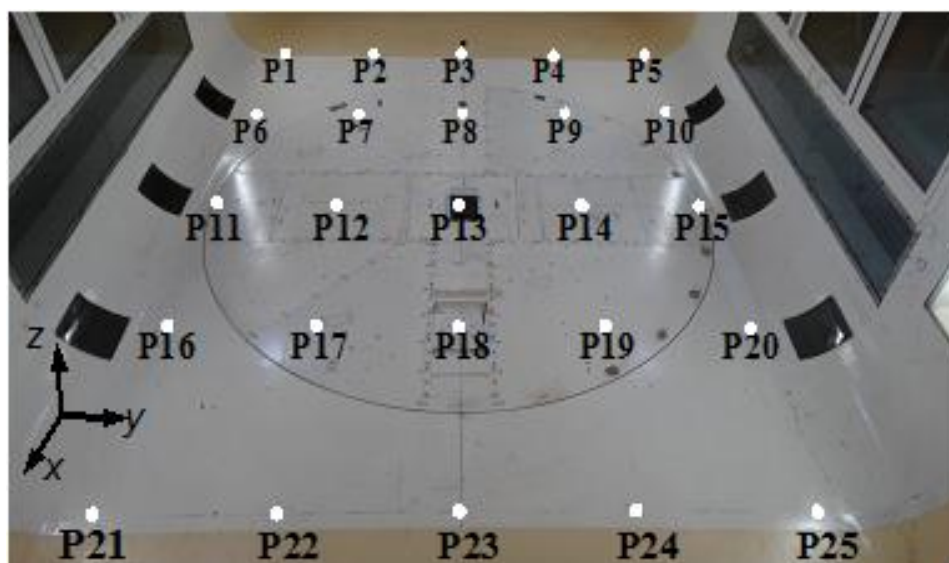


Figura 3. Pontos em que o *Rake* foi posicionado na seção de ensaios.

O material utilizado para a determinação do crescimento da camada limite foi o *rake* 16 com 16 tubos tomadas de pressão espaçados e numerados de 1 a 16 contados a partir da parede em que o mesmo se apoia (Figura 4). Os 16 tubos estão fixados no *rake* 16 nas posições 1,7, 8,3, 13,2, 18,0, 23,1, 28,0, 33,1, 38,1, 43,1, 48,2, 53,3, 63,2, 73,3, 83,3, 93,1 e 103,2 mm. O *rake*

16 foi posicionado em 5 posições a jusante na seção longitudinal central da seção de ensaios seguindo a seguinte sequência P31, P30, P29, P32 e P33 (Figura 5).



Figura 4. *Rake* 16 para a medição de camada limite com 16 tubos, posicionado na parede inferior da seção de ensaios do TA-2. A seta indica o sentido do escoamento.

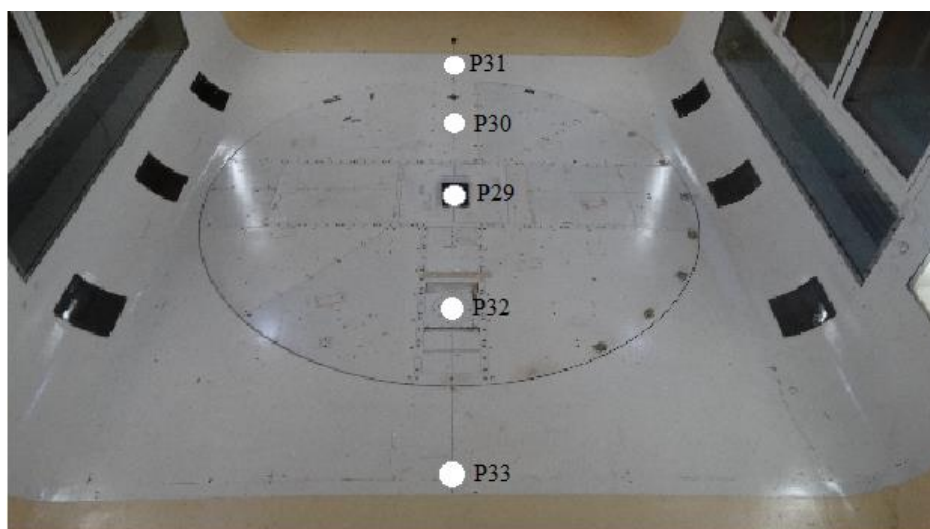


Figura 5. Esquema de identificação da localização do *rake* 16 na seção central da seção de ensaios. O observador está de frente para o escoamento.

As tomadas de pressão total dos *rakes* 15 e 16 foram ligadas a um sensor de pressão do tipo *scanner*, com capacidade de até 32 canais e faixa de medição de 1 psi (6.894,75 Pa).

Para a medição da pressão estática de referência, realizada por um tubo de Pitot posicionado na entrada da seção de ensaios, foi utilizado outro sensor tipo *scanner* com faixa de 10 polH<sub>2</sub>O (2.490,889 Pa).

A calibração dos instrumentos foi realizada na seção de ensaios do TA-2 com o equipamento Druck, dpi 610, de 70 mbar (7.000 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 *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 escoamento,  $V$  [2]:

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

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 nos *rakes*.

A massa específica do ar é calculada por:

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

onde:

$p_\infty$  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.

## 2.2. Propagação de incerteza

As incertezas da velocidade,  $u_v$ , são calculadas utilizando a lei de propagação de incertezas [3]. Para o caso de variáveis independentes, a incerteza padrão combinada é a raiz quadrada positiva de:

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (4)$$

onde:  $y$  é a grandeza de saída, o mensurando [4], e  $x_i$  são as grandezas de entrada.

Aplicando Eq. 4 nas Eqs. 2 e 3 resulta em:

$$u_v^2 = \left( \frac{1}{\rho} \left[ \frac{2(p_{0local} - p_{local})}{\rho} \right]^{-\frac{1}{2}} \right)^2 u_{p_{0local}}^2 + \left( \frac{-1}{\rho} \left[ \frac{2(p_{0local} - p_{local})}{\rho} \right]^{-\frac{1}{2}} \right)^2 u_{p_{local}}^2 + \left( \frac{(p_{local} - p_{0local})}{\rho^2} \left[ \frac{2(p_{0local} - p_{local})}{\rho} \right]^{-\frac{1}{2}} \right)^2 u_{\rho}^2 \quad (5)$$

$$u_{\rho}^2 = \left( \frac{1}{RT} \right)^2 u_{p_{\infty}}^2 + \left( \frac{-p_{\infty}}{RT^2} \right)^2 u_T^2 \quad (6)$$

Na Eq. 6, as incertezas  $u_{p_{\infty}}$  e  $u_T$  são quantificadas a partir do desvio padrão da média de cinco corridas em condições de repetibilidade. Exemplificando para a pressão estática do escoamento livre:

$$u_{p_{\infty}} = \frac{S}{\sqrt{5}} \quad (7)$$

onde:  $S$  é o desvio padrão das cinco corridas.

### 3. Resultados

Os resultados apresentados neste relatório final correspondem à distribuição da velocidade do escoamento nos 25 pontos localizados na seção de ensaios e a determinação da espessura da camada limite,  $\delta$ , ambos no regime de escoamento referente à pressão dinâmica de 300 mmH<sub>2</sub>O. Foi convencionado que a espessura  $\delta$  seria determinada quando a velocidade alcançasse aproximadamente 98% do valor da velocidade do escoamento livre. A redução de dados também considerou os demais regimes, mas não estão aqui representados; um artigo

foi elaborado para a divulgação mais completa dos resultados.

### 3.1 Distribuição das velocidades do escoamento na seção de ensaios

A velocidade  $V$  do escoamento foi calculada através da Eq. 2 sendo necessário também o cálculo da massa específica  $\rho$  usando a Eq. 3. Foi desenvolvido um programa no software Matlab™ para visualização da distribuição das velocidades nas seções transversais da seção de ensaios. A figura 6 apresenta a razão  $V_{\text{local}}/V_{\infty}$ , onde  $V_{\text{local}}$  são as velocidades obtidas pelo *Rake* 15 em suas respectivas alturas e  $V_{\infty}$  é a velocidade obtida pelo tubo de Pitot posicionado na entrada da seção de ensaios.

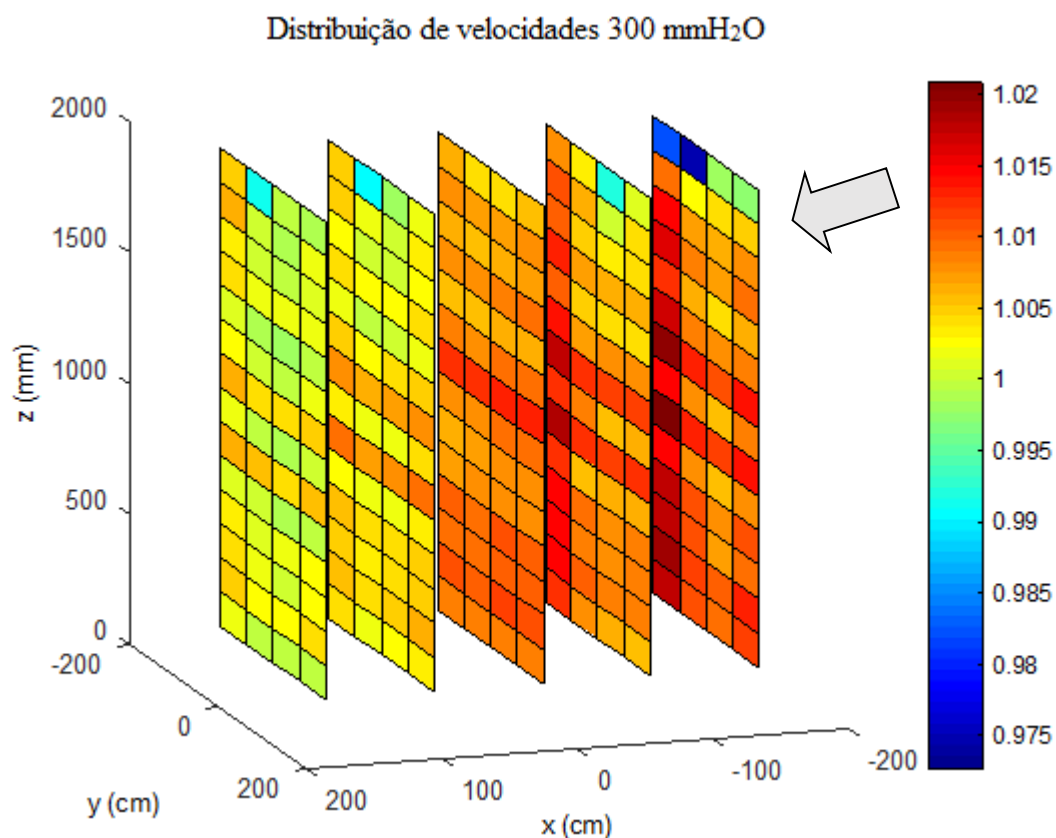


Figura 6. Distribuição de velocidades em termos de porcentagem de  $V_{\infty}$  em toda a seção de ensaios. A seta indica o sentido do escoamento.

### 3.2 Crescimento da camada limite

A velocidade,  $V$ , foi estimada com base na Eq. 2 e a incerteza,  $u_V$ , foi calculada a partir da Eq. 5. Foi necessário o cálculo da Eq. 6 para que a incerteza da massa específica,  $u_\rho$ , fosse incluída na Eq. 5. O regime de velocidade é de pressão dinâmica a 300 mmH<sub>2</sub>O. A espessura da camada limite é apresentada em termos de porcentagem do escoamento livre. Na tabela 1 foi destacada em vermelho a região que se encontra dentro da camada limite. Assim tornou-se mais simples visualizar até que altura a camada limite teria interferência nos ensaios dos modelos na seção de ensaios do TA-2.

Tabela 1. Valores de velocidade,  $V$ , e incerteza associada,  $u_V$ , nas posições P31, P30, P29, P32 e P33. Regime 300 mmH<sub>2</sub>O.

$z$ (mm)	P31			P30			P29			P32			P33		
	$V$ (m/s)	$u_V$ (m/s)	% $V_\infty$	$V$ (m/s)	$u_V$ (m/s)	% $V_\infty$	$V$ (m/s)	$u_V$ (m/s)	% $V_\infty$	$V$ (m/s)	$u_V$ (m/s)	% $V_\infty$	$V$ (m/s)	$u_V$ (m/s)	% $V_\infty$
1,7	51,46	0,16	69,35	34,72	0,18	46,74	49,62	0,09	66,80	31,90	0,26	42,95	27,89	0,43	37,59
8,3	55,48	0,18	74,77	54,19	0,14	72,95	53,19	0,09	71,60	49,35	0,18	66,44	50,73	0,22	68,38
13,2	57,98	0,16	78,15	57,26	0,12	77,08	56,36	0,12	75,87	52,19	0,17	70,26	53,63	0,21	72,28
18,0	60,77	0,17	81,90	59,68	0,12	80,35	58,77	0,12	79,12	54,86	0,19	73,85	55,83	0,20	75,24
23,1	63,32	0,16	85,34	62,19	0,10	83,71	60,75	0,09	81,79	57,71	0,14	77,68	58,02	0,22	78,20
28,0	65,00	0,16	87,60	63,82	0,10	85,92	62,46	0,09	84,08	59,57	0,13	80,20	59,50	0,21	80,20
33,1	66,63	0,16	89,81	65,39	0,10	88,03	64,26	0,10	86,51	61,36	0,13	82,61	60,93	0,22	82,11
38,1	68,09	0,15	91,76	66,83	0,12	89,96	65,65	0,10	88,38	62,93	0,14	84,71	62,47	0,18	84,19
43,1	69,42	0,17	93,56	68,20	0,12	91,82	67,20	0,12	90,46	64,38	0,18	86,66	63,74	0,20	85,90
48,2	70,64	0,15	95,20	69,49	0,13	93,55	68,29	0,13	91,93	65,76	0,17	88,52	65,21	0,20	87,89
53,3	71,49	0,12	96,36	70,41	0,14	94,79	69,40	0,09	93,43	66,99	0,11	90,18	66,35	0,18	89,42
63,2	72,52	0,11	97,74	71,96	0,12	96,87	70,94	0,08	95,50	68,77	0,09	92,58	68,31	0,17	92,07
73,3	73,23	0,10	98,68	73,02	0,11	98,30	72,03	0,06	96,97	70,36	0,10	94,72	70,04	0,15	94,39
83,3	73,53	0,10	99,09	73,61	0,08	99,10	72,85	0,08	98,07	71,54	0,11	96,31	71,26	0,20	96,05
93,1	73,63	0,10	99,24	73,91	0,09	99,50	73,28	0,07	98,65	72,24	0,11	97,24	72,17	0,19	97,27
103,2	73,81	0,10	99,48	74,17	0,08	99,85	73,46	0,06	98,90	72,85	0,11	98,07	72,91	0,19	98,26

#### 4. Próximas Etapas

O próximo passo para a pesquisa será fazer a análise dos coeficientes aerodinâmicos de um modelo aeronáutico padrão fabricado de acordo com requisitos geométricos internacionais





visando ensaios interlaboratoriais de comparação de resultados gerados em túneis de vento.

## **5. Conclusões**

Concluiu-se que, no TA-2, a velocidade do escoamento diminui do início para o final da seção de ensaios apresentando uma uniformidade na seção transversal central conforme o esperado, pois, túneis de vento são projetados e construídos com a intenção de se ter um escoamento o mais laminar possível em sua área central onde são fixados os modelos. Em relação ao crescimento da camada limite, foi constatado que a mesma cresce cerca de 29,9 mm ao longo da seção longitudinal central a jusante.

## **6. Divulgação dos Resultados**

Um artigo foi elaborado para divulgar os resultados da presente campanha de ensaios no congresso da International Measurement Confederation, IMEKO, em Belfast, setembro 2018.

## **Referências**

- [1] Barlow, J.B., Rae, W.H., Pope, A.P, 1999. Low-Speed Wind Tunnel Testing. John Wiley & Sons, New York.
- [2] Anderson Jr., J.D., 2001. Fundamentals of Aerodynamics. John Wiley & Sons, New York.
- [3] 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.
- [4] JCGM 200: 2012. International vocabulary of metrology-Basic and general concepts and associated terms (VIM). BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML. 2012.