

## Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Estudo de ondas de choque em túnel transônico  
Bolsista: Thiago Neves Cunha  
Orientador (a): Maria Luisa Collucci da Costa Reis  
Período a que se refere o relatório: Maio de 2014 a Julho de 2014

### Resumo

Este trabalho faz parte de um estudo sobre ondas de choque em túneis de vento. Estão apresentadas neste relatório as atividades referentes a dois meses de familiarização com o ambiente MatLab<sup>®</sup>, normalmente utilizado para redução de dados dos ensaios nos túneis de vento subsônico, TA-2, e transônico piloto, TTP, da Divisão de Aerodinâmica do Instituto de Aeronáutica e Espaço. IAE/ALA. Foram elaborados códigos computacionais para a estimativa de coeficiente de pressão,  $C_p$ , e de número de Mach,  $M$ , na seção de ensaios do TA-2 e do TTP, respectivamente. Curvas de calibração de distribuição de pressão em função da posição longitudinal,  $C_{p\alpha\alpha}$ , foram fornecidas por ajuste de curva utilizando o método de mínimos quadrados. As incertezas dos valores de  $C_p$  nos pontos medidos e a incerteza no ajuste de curvas foram avaliadas pela aplicação da Lei de Propagação de Incertezas. Observou-se que a qualidade do ajuste aos dados experimentais do TA-2 não está adequada para a modelagem matemática de primeiro grau esperada para as curvas de calibração  $C_{p\alpha\alpha}$ . No caso do TTP, empregou-se dois métodos de avaliação de incerteza nos valores de número de Mach: o método de Monte Carlo e a Lei de Propagação de Incertezas. As diferenças entre os resultados obtidos nos dois métodos deixam de ser significativas quando o número de jogadas do método Monte Carlo é igual a 1.000.000.

### 1. Introdução

Túneis de vento são instalações laboratoriais utilizadas para ensaiar modelos de aeronaves e prever o seu comportamento aerodinâmico durante vôo real.

A quantificação da uniformidade do escoamento na seção de ensaios do túnel é fundamental para a avaliação dos efeitos aerodinâmicos impostos pelo vento sobre o modelo.

Recentemente, foram realizadas campanhas de ensaios para avaliar a distribuição de pressão,  $C_p$ , na seção de ensaios do túnel subsônico TA-2 e a distribuição de número de Mach,  $M$ , no túnel transônico TTP.

Neste trabalho, elaborou-se dois códigos computacionais. O primeiro para disponibilizar curvas de calibração  $C_{p \times x}$  do escoamento em função da posição ao longo da seção de ensaios do túnel de vento TA-2. O segundo, para estimar valores de número de Mach,  $M$ , e das incertezas associadas,  $u_M$ , na região central da seção de ensaios do TTP.

No TA-2, as curvas de calibração podem ser utilizadas pela equipe de aerodinamicistas para estudo de correção de efeitos de parede. No TTP, para o estudo de configuração de condições de controle do túnel para otimização da uniformidade de escoamento.

## 2. Material e métodos

As grandezas medidas no experimento do túnel subsônico TA-2 foram pressão estática num determinado local do escoamento,  $p$ , pressão estática do escoamento não perturbado,  $p_\infty$ , e pressão dinâmica do escoamento não perturbado,  $q_\infty$ .

Tomadas de pressão distribuídas nas paredes da seção de ensaios forneceram as medidas de pressão estática,  $p$ . Um total de 108 tomadas foram dispostas em 9 placas de alumínio localizadas no teto e nas laterais esquerda e direita (Figura 1).

Cada placa possui 36 tomadas de pressão, sendo a distância entre as tomadas igual a 140 mm. A instrumentação utilizada inclui sensores de pressão do tipo “ZOC 33 pressure scanner Scanicalve”.

Os dados experimentais foram usados para estimar o comportamento do  $C_p$  através de uma região longitudinal da seção de ensaios numa velocidade correspondente a uma pressão de 50 mm de água.



Figura 1: Seção de ensaios do TA-2 com as placas de tomadas de pressão. A montante do escoamento se vê tubos de Pitot.

A modelagem matemática do experimento é (Anderson, 2007):

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{q_\infty} = \frac{\Delta p}{q_\infty} \quad \text{Eq. (1)}$$

onde:

$\Delta p = p - p_\infty$ : diferença entre a pressão estática numa determinada tomada de pressão,  $p$ , e pressão estática medida na entrada da seção de ensaios,  $p_\infty$ ;

$q_\infty$ : pressão dinâmica medida no sensor de pressão diferencial conectado ao tubo de Pitot localizado no teto da seção de ensaios.

A aplicação da lei de propagação de incerteza na Eq. (1) resulta em (JCGM 100, 2008):

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

No túnel transônico TTP a uniformidade do número de Mach foi avaliada posicionando-se uma sonda com 33 tomadas de pressão na região central da seção de ensaios. As tomadas fornecem a pressão estática,  $p$ , e são identificadas por C1 a C33 (Figura 2). A pressão total do escoamento,  $p_0$ , é medida na câmara de tranquilização. Na redução de dados, foram usadas as medições adquiridas nas tomadas C14 a C28. O regime de escoamento considerado neste estudo corresponde a um número de Mach nominal de 0.80. A instrumentação de pressão consiste de um módulo de pressão com 32 canais (pressure scanner ESP-32BP PSI™).

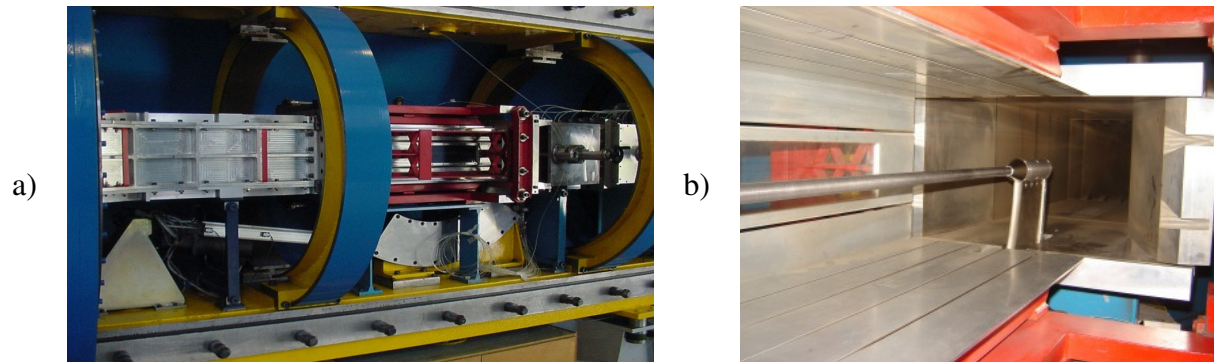


Figura 2: a) Seção de ensaios do TTP e b) sonda de pressão posicionada no centro da seção de ensaios.

O número Mach,  $M$ , e sua incerteza,  $u_M$ , são estimadas a partir das equações 3 e 4 (Anderson, 2007 e JCGM 100, 2008):

$$M^2 = \frac{2}{\gamma - 1} \left[ \left( \frac{p_0}{p} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right] \quad (\text{Eq. 3})$$

$$u_M^2 = \left( \frac{0.7}{M} \right)^2 \left[ \frac{1}{p^2} \left( \frac{p}{p_0} \right)^{1.44} u_{p_0}^2 + \left( \frac{-p_0}{p^2} \right)^2 \left( \frac{p}{p_0} \right)^{1.44} u_p^2 \right] \quad (\text{Eq. 4})$$

onde

$p_0$ : pressão total;

$p$ : pressão estática; e

$\gamma$ : taxa de calor específico a pressão constante e a volume constante,  $\gamma = 1.4$  para gás perfeito.

Como ferramenta computacional, utilizou-se o software interativo MatLab<sup>®</sup> para auxílio matemático. A redução de dados inclui a estimativa dos valores da distribuição de pressão,  $C_p$ , ao longo da seção de ensaios do TA-2 e dos valores do número de Mach,  $M$ , no TTP, bem como a avaliação da incerteza nos pontos medidos. Ajustes de curva pelo método dos mínimos quadrados e avaliação da incerteza do ajuste (Press *et al*, 1992) também foram realizados nos dados do TA-2. A aplicação da lei de propagação de incerteza aos dados do TTP foi comparada com os resultados obtidos pelo método Monte Carlo (JCGM 102, 2011).

### 3. Resultados

A seguir são apresentadas na figura 3 as curvas de calibração da distribuição de pressão no TA-2,  $C_{pXX}$ . A curva ajustada é um polinômio de primeiro grau. A Lei de Propagação de Incertezas foi utilizada para estimar as incertezas nos pontos (Eq. 2) e também para estimar os limites de incerteza nas curvas de calibração.

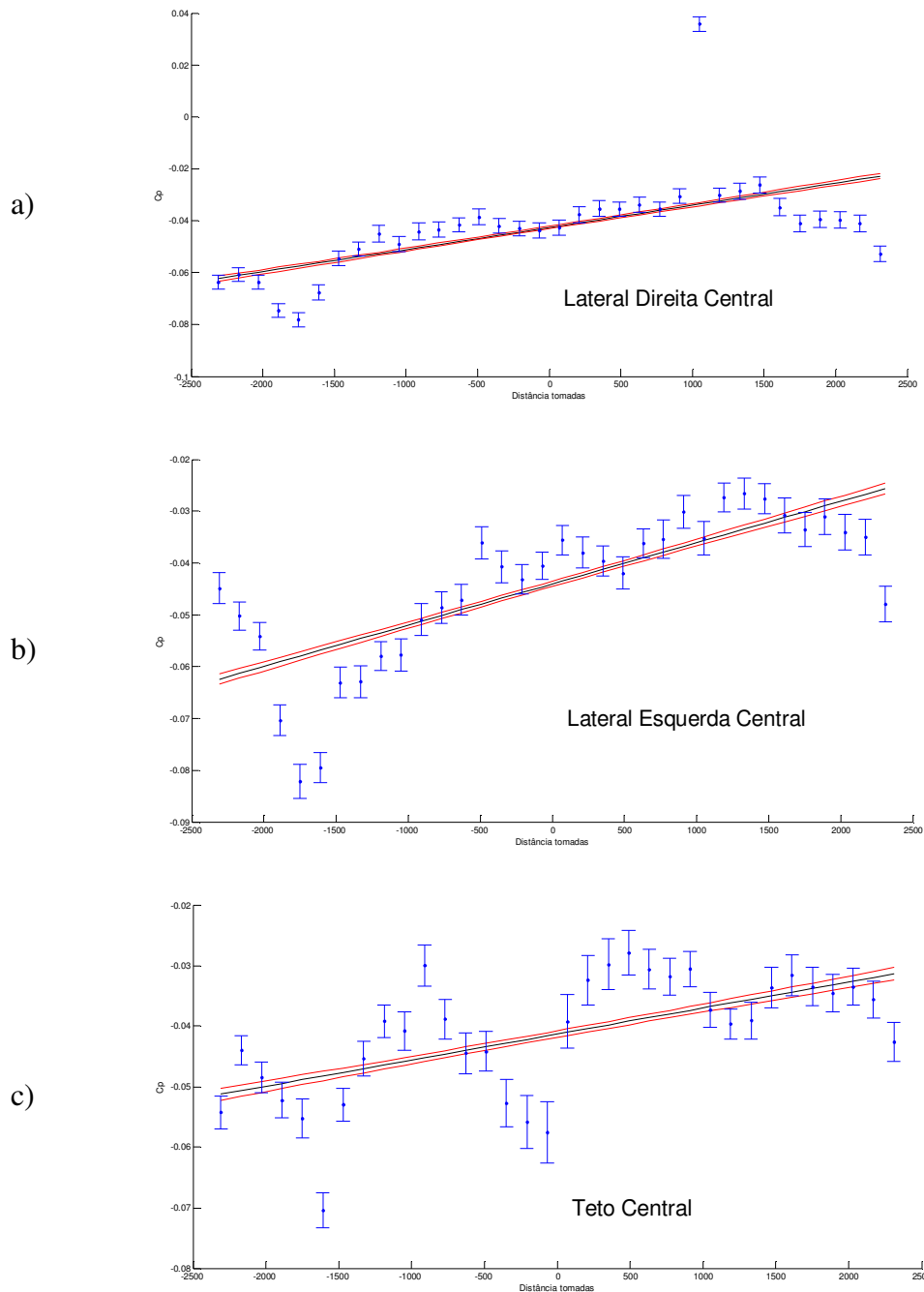


Figura 3: Ajuste de curva de 1.<sup>o</sup> grau aos dados de  $C_p$  obtidos nas placas centrais das paredes a) lateral direita b) lateral esquerda e c) teto, do TA-2. Unidades de distância em milímetros.

Observou-se que a qualidade do ajuste não está adequada para uma distribuição correspondente a uma curva de primeiro grau, o que significa que o experimento deve ser repetido.

O código computacional desenvolvido permite escolha do grau do polinômio. O melhor ajuste foi para polinômio de 6.<sup>o</sup> grau, como visto na figura 4.

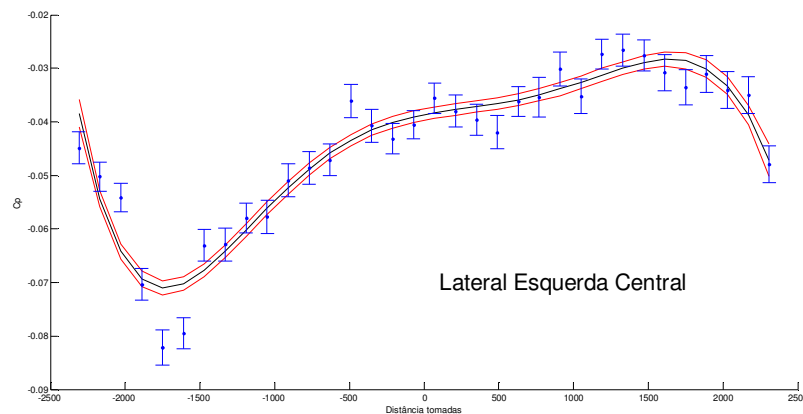


Figura 4: Ajuste com polinômio de 6.<sup>o</sup> grau.

Na figura 5 estão apresentados os valores de número de Mach,  $M$ , na região central da seção de ensaios do TTP. As barras de erro foram calculadas por dois procedimentos distintos: Lei de Propagação de Incertezas (Eq. 4) e método Monte Carlo. As diferenças nos resultados originados nos dois métodos passam a ser negligenciáveis a partir do número de jogadas igual a 1.000.000, como apresentado na Tabela 1.

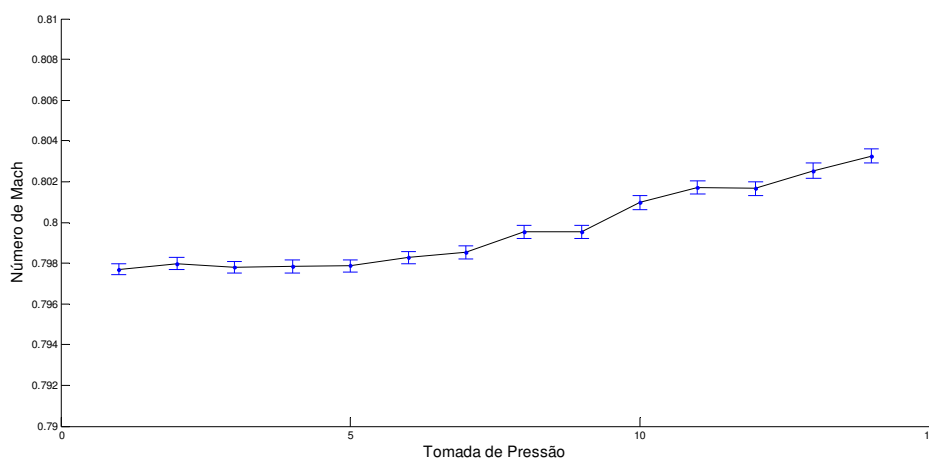


Figura 5: Distribuição de número de Mach na seção de ensaios do TTP.

Tabela 1: Incerteza nos valores de número de Mach,  $u_M$ . Quantidade de dígitos mantidos para fins de comparação.

Tomada de pressão	$u_M$ Lei de Propagação de Incerteza	$u_M$ método Monte Carlo
C14	0,000275606789889258	0,000281630298235953
C15	0,000312373378726901	0,000319147338321850
C16	0,000298982252635754	0,000305803979702214
C17	0,000315170190426325	0,000322024464823008
C18	0,000306540997450986	0,000313402778292510
C19	0,000302422776365472	0,000309303609274763
C20	0,000321972634598675	0,000328994092546438
C21	0,000320657747236106	0,000328013234542560
C22	0,000327388918794851	0,000334981270478994
C23	0,000319313269490484	0,000326466873222216
C24	0,000344933888729261	0,000352720878390949
C25	0,000324735092181530	0,000332132526668453
C26	0,000337450793154197	0,000345370319797311
C27	0,000383669150588536	0,000392407345644781
C28	0,000348122799718795	0,000356404882809863

#### 4. Conclusões

Para fins de familiarização com o ambiente MatLab<sup>®</sup>, foram elaborados códigos computacionais para a redução de dados de ensaios nos túneis subsônico, TA-2, e transônico TTP. Os parâmetros estimados na redução consistiram em coeficientes de pressão,  $C_P$ , e números de Mach,  $M$ . As incertezas nos parâmetros foram avaliadas e curvas de calibração de distribuição de pressão na seção de ensaios do TA-2 foram fornecidas.

Os ajustes de curvas de distribuição  $C_P$  nas placas não apresentaram qualidade de ajuste esperado, indicando que os ensaios devem ser repetidos. Fontes de erro na aquisição de dados foram reconhecidas e ações para minimizá-las estão sendo providenciadas.

Os resultados de número de Mach na seção de ensaios do TTP indicaram um gradiente a jusante do escoamento, como observado na Figura 5. Ensaios com diferentes configurações



no circuito do túnel, como controle de flapes, devem ser realizados para minimizar o gradiente.

Valores de incerteza de número de Mach foram obtidos pela Lei de Propagação de Incerteza e pelo método Monte Carlo. O número de jogadas no código computacional foi selecionada para 1000, 10.000, 100.000 e 1.000.000. Os resultados entre os dois métodos se tornam compatíveis para 1.000.000.

## Referências

Anderson Jr. J. D., *Fundamentals of Aerodynamics*, Mc Graw Hill, New York, p 985, 2007.

BIPM/JCGM 100, Evaluation of measurement data-Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995 with minor corrections), p 134, 2008.

BIPM/JCGM 102, Evaluation of measurement data-Supplement 2 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement”-Extension to any number of output quantities, p 80, 2011.

Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P., *Numerical Recipes*, Cambridge University Press, 2<sup>nd</sup> ed, p 759, 1992.