

AVALIAÇÃO DA INCERTEZA NA CORREÇÃO DAS PRESSÕES ESTÁTICA E DINÂMICA EM UM ENSAIO EM TÚNEL DE VENTO

Maria Luísa Collucci da Costa Reis

Centro Técnico Aeroespacial
Instituto de Aeronáutica e Espaço
Praça Mal. Eduardo Gomes, nº 50
São José dos Campos, São Paulo
12228-904
mluisareis@bol.com.br

Olympio Achilles de Faria Mello

Centro Técnico Aeroespacial
Instituto de Aeronáutica e Espaço
Praça Mal. Eduardo Gomes, nº 50
São José dos Campos, São Paulo
12228-904
oamello@directnet.com.br

Matsuo Chisaki

Centro Técnico Aeroespacial
Instituto de Aeronáutica e Espaço
Praça Mal. Eduardo Gomes, nº 50
São José dos Campos, São Paulo
12228-904
matsuo@iae.cta.br

Resumo. A pressão estática p no túnel de vento subsônico número 2, TA-2, do Laboratório de Ensaios Aerodinâmicos ASA-L, do Instituto de Aeronáutica e Espaço – IAE, do Centro Técnico Aeroespacial – CTA, é medida a partir de um sensor de pressão absoluta, colocado na parede superior da seção de ensaio. Esta medição não é realizada na posição em que é colocado o modelo a ser ensaiado, o que leva à necessidade de uma correção. A identificação e avaliação desta fonte de erro é importante pois a pressão estática é uma grandeza de entrada para o cálculo da pressão total p_t , do número de Mach M , e da massa específica ρ do escoamento. Neste trabalho são apresentadas a correspondência entre a pressão estática medida na parede superior do túnel e a pressão estática na posição do modelo e a propagação de incerteza através dos parâmetros do escoamento.

Palavras chave: qualidade de escoamento, incerteza da medição, ensaios em túnel de vento.

1. Introdução

Ensaio em túnel de vento são fundamentais para o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de projetos aerodinâmicos. Informações fornecidas no túnel auxiliam no cálculo de cargas aerodinâmicas provocadas pelo vento e dão suporte à tomada de decisão no que diz respeito à melhoria e à otimização do projeto. Uma grande variedade de túneis de diferentes formas, dimensões e potência, existe ao redor do mundo, com o propósito de realizar vários tipos diferentes de medições aerodinâmicas: cargas, pressões, trajetografia, visualizações etc., em diferentes tipos de modelos ensaiados e em grande faixa de velocidade do escoamento.

O túnel de vento TA-2, do Laboratório de Ensaio Aerodinâmicos ASA-L, do Instituto de Aeronáutica e Espaço – IAE, do Centro Técnico Aeroespacial - CTA, é um túnel do tipo contínuo fechado que opera em regime subsônico, com velocidade e potência máximas típicas de 140 m/s e 1,18 MW. A seção de ensaio possui forma geométrica retangular, com uma área de 6,30 m². Os principais clientes do TA-2 são as Forças Armadas, as indústrias aeronáutica, naval e de construção civil, as entidades de ciência e tecnologia, e as universidades. Os modelos ensaiados incluem aeronaves, veículos espaciais e submarinos, plataformas de petróleo, viadutos, mastros e edifícios.

O estudo conduzido com este trabalho tem como objetivo geral contribuir para a garantia da confiabilidade metrológica dos ensaios realizados no túnel de vento TA-2. Mais especificamente, a medição e a análise de irregularidades de escoamento identificam fontes de erro que podem ser quantificadas e consideradas na estimação de incertezas.

Um levantamento de fontes de erro dos ensaios realizados no TA-2 e a descrição de uma metodologia sistematizada para avaliação de incertezas dos parâmetros aerodinâmicos do ensaio são apresentados em Reis (2000) e em Reis et alii

(2000). Uma análise retrospectiva e perspectiva relacionada à avaliação, controle e melhoria de qualidade de escoamento em túneis de vento pode ser encontrada em Owen (2000).

1.1. Medição da pressão

Na tecnologia de ensaios aerodinâmicos, há três definições de pressão para fluidos em movimento (Benedict, 1977), devido ao fato das moléculas num escoamento de gás possuírem um movimento aleatório superposto a um movimento direto devido à velocidade do escoamento. A terminologia aplicada é:

- pressão estática p : é a pressão real do gás, estando ele em movimento ou em repouso. Pressão estática num dado ponto é a pressão que seria medida por um sensor se movimentando junto com o escoamento; decorre do movimento aleatório das moléculas transferindo seus momentos para as superfícies;
- pressão dinâmica q : é a pressão equivalente à energia cinética direta do escoamento; e
- pressão total p_t : soma das pressões estática e dinâmica. Pressão total num dado ponto do escoamento é a pressão que existiria se o escoamento fosse freado isentropicamente (sem perdas e sem transferência de calor) à velocidade zero. Para o caso do gás que não está em movimento, a pressão total e a pressão estática são sinônimos (Anderson, 1984).

O instrumento que mede a pressão total num ponto do escoamento é o tubo de Pitot. Uma combinação de medição de pressão estática e pressão total pode ser obtida no mesmo instrumento, como mostrado na Fig. (1), que é denominado tubo de Pitot estático.

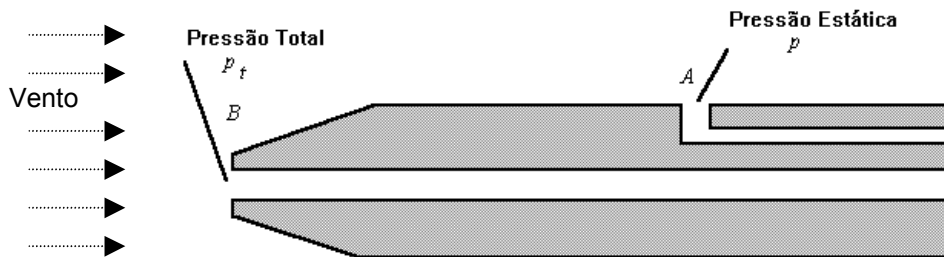


Figura 1: Esquema da ponta de prova do tubo de Pitot. Pequenos orifícios no tubo (A) fornecem a pressão estática p . A pressão total p_t é tomada em B.

1.2. Correção da Pressão Estática

A medição de pressão no TA-2 é realizada através de um tubo de Pitot estático acoplado a um sensor diferencial. O tubo de Pitot é fabricado por “Airflow Developments Limited”. Para medir a pressão dinâmica q , é usado um elemento sensor de pressão diferencial da marca “Statham”, faixa 2,5 psi (17.236,89323 Pa), número de série 16900, modelo PM6TC. A pressão estática p , tomada do lado esquerdo da Fig. (2), é conectado um sensor de pressão absoluta da marca “Paroscientific”, faixa 11,5 a 16,0 psia (79.289,70887 a 110.316,1167 Pa), resolução 0,1 psia (689,4757 Pa), modelo 216B-101, número de série 67001. A pressão total p_t é calculada pela soma de q e p .

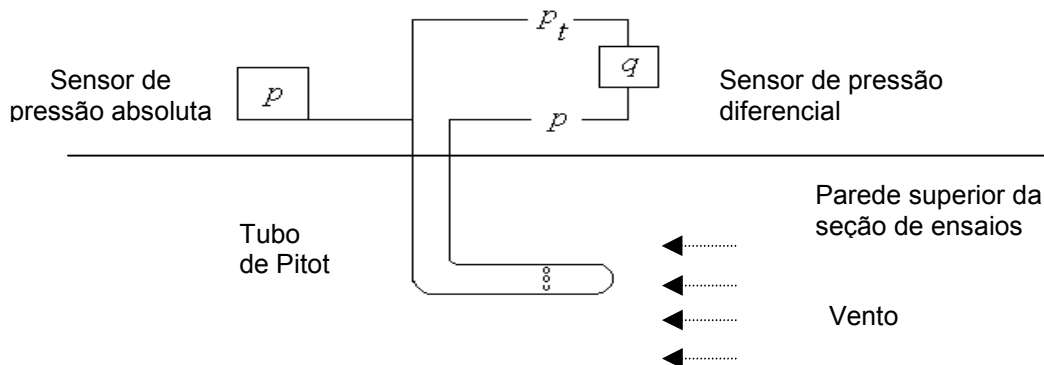


Figura 2: Tomada de pressão. Um sensor diferencial fornece a pressão dinâmica q . Um sensor de pressão absoluta fornece a pressão estática p .

As medições das pressões dinâmica e estática não são realizadas na posição onde o modelo será ensaiado, o que leva à necessidade de uma correção. Para calcular esta correção, duas montagens semelhantes ao especificado na Fig. (2) são colocadas na seção de ensaios do túnel TA-2. Uma delas é colocada na parede superior da seção (posição 1) e a outra é colocada na posição onde ficará o modelo durante o ensaio (posição 2), como mostrado na Fig. (3). Adiciona-se um outro sensor diferencial, para medir a diferença entre as pressões estáticas ($\Delta p = p_1 - p_2$) nas duas localizações.

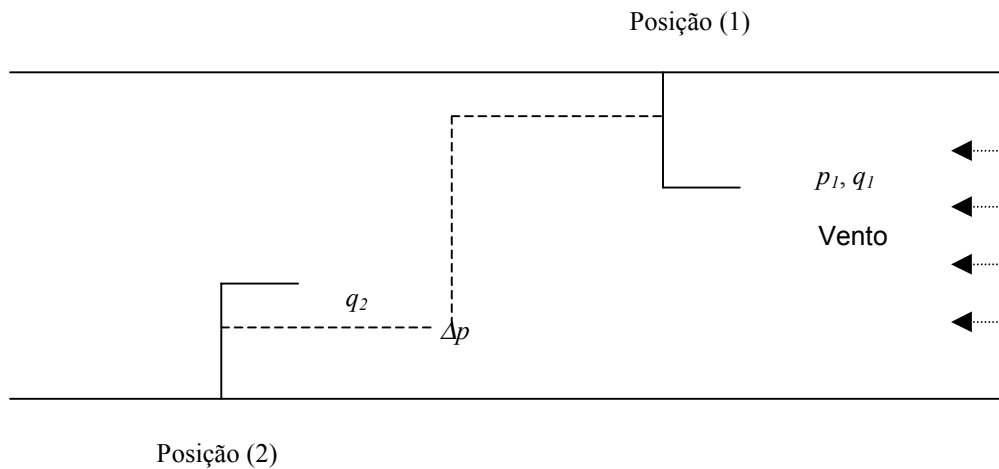


Figura 3: Correção da pressão estática na seção de ensaios do TA-2.

2. Modelagem matemática

Neste trabalho serão analisados escoamentos do ar, aqui considerado como um gás ideal. As grandezas físicas fundamentais no escoamento são: temperatura T , pressão p , massa específica ρ e velocidade V . O conhecimento destas grandezas em cada ponto do escoamento define completamente o campo (Anderson, 1984).

Para o regime subsônico de baixa velocidade considerado, foi adotada a situação de escoamento incompressível e não viscoso.

2.1. Campo de escoamento

As variáveis pressão estática p , pressão dinâmica q , pressão total p_t , massa específica ρ , temperatura T , e velocidade V do escoamento, se relacionam entre si através das equações de Bernoulli e de estado do gás ideal (Anderson, 1984):

As expressões para pressão total, massa específica, velocidade e número de Mach do escoamento são, respectivamente:

$$p_t = p + q \quad (1)$$

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (2)$$

com R sendo a constante universal dos gases.

$$V = \sqrt{\frac{2q}{\rho}} \quad (3)$$

Por definição, o número de Mach M num ponto é a relação entre a velocidade do escoamento V e a velocidade do som a :

$$M = \frac{V}{a} \quad (4)$$

sendo a expresso por:

$$a = \sqrt{\gamma RT} \quad (5)$$

com a taxa entre calores específicos γ igual a 1,4.

2.2. Lei da propagação de incertezas

Uma expressão completa do resultado de uma medição deve incluir uma declaração da incerteza (INMETRO, 1995). Portanto, o valor de um mensurando Y deve ser expresso como (BIPM, 1995):

$$Y = \bar{Y} + U \quad (6)$$

Quando o mensurando Y é medido indiretamente, ou seja, se ele for determinado a partir de outras grandezas de entrada (X_1, X_2, \dots, X_N), onde N é o número de grandezas de entrada, devemos identificar a relação funcional:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (7)$$

A incerteza padrão de y , sendo y a estimativa do mensurando Y , e portanto do resultado da medição, é obtida combinando adequadamente as incertezas padrão das estimativas de entrada x_1, x_2, \dots, x_N . Denotada por $u_c(y)$, a incerteza padrão combinada é a raiz quadrada positiva da variância combinada $u^2_c(y)$, que é dada pela Eq. (8) abaixo, ou seja, é um desvio padrão estimado e caracteriza a dispersão dos valores que poderiam razoavelmente ser atribuídos ao mensurando Y :

$$u^2_c = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (8)$$

com $u(x_i)$ representando todas as incertezas originadas na medição de x_i . Esta expressão é válida para grandezas de entrada não correlacionadas.

2.3. Incerteza dos parâmetros do escoamento

A expressão da incerteza padrão combinada, calculada a partir da Eq. (8), para a pressão total, massa específica, velocidade e número de Mach, são, respectivamente:

$$u^2_{p_t} = u^2_p + u^2_q \quad (9)$$

$$u^2_p = \left(\frac{1}{RT} \right)^2 u^2_p + \left(\frac{-p}{R^2 T} \right)^2 u^2_R + \left(\frac{-p}{RT^2} \right)^2 u^2_T \quad (10)$$

ou como incerteza padrão combinada relativa:

$$\frac{u^2_p}{\rho} = \left(\frac{1}{p} \right)^2 u^2_p + \left(\frac{-1}{R} \right)^2 u^2_R + \left(\frac{-1}{T} \right)^2 u^2_T \quad (11)$$

$$u^2_V = \left(\frac{\sqrt{2}}{2} q^{-1/2} \rho^{-1/2} \right)^2 u^2_q + \left(\frac{\sqrt{2}}{2} q^{1/2} \rho^{-3/2} \right)^2 u^2_\rho \quad (12)$$

$$u^2_M = \left(\frac{1}{a} \right)^2 u^2_V + \left(\frac{-V}{a^2} \right)^2 u^2_a \quad (13)$$

para uma incerteza na velocidade do som no ar dada por:

$$u_a^2 = \left(\frac{\gamma R}{2a} \right)^2 u_T^2 \tag{14}$$

para incertezas em γ e em R desprezíveis.

3. Resultados e Discussões

Com o túnel em funcionamento, efetuam-se simultaneamente, as medições da pressão estática na posição (1), p_1 , da pressão dinâmica na posição (1), q_1 , e na posição 2, q_2 , e da diferença de pressão estática entre as posições (1) e (2), Δp , para valores de velocidade ascendentes e descendentes.

A Tab. (1) apresenta os valores das leituras indicadas pelos instrumentos. É medida também a temperatura T na posição (1), através de um sensor de platina, fabricante “Temptram”, modelo AS5250TT246N75A2N2, para fins de cálculo da massa específica do escoamento.

Tabela 1: leituras para a pressão dinâmica e pressão estática na posição (1) (q_1 e p_1) e para a pressão dinâmica q_2 na posição (2). A temperatura T é medida na posição (1). Unidades em milivolts.

leitura	q_1	q_2	Δp	T	p_1
1	0,08556	2,16896	2,82311	2,87167	5,40522
2	2,66991	6,91583	2,73839	2,91000	5,34769
3	5,32700	11,79317	2,65672	2,93945	5,28821
4	7,84404	16,40438	2,59435	2,94470	5,23216
5	10,52283	21,36641	2,51651	2,95218	5,17341
6	13,05758	26,01773	2,43632	2,97764	5,11580
7	15,65896	30,78167	2,36222	2,99625	5,05878
8	18,32913	35,74431	2,28946	3,00417	4,99733
9	15,77371	31,20034	2,33933	3,04986	5,05649
10	13,18710	26,29075	2,43449	3,06595	5,11364
11	10,48690	21,33562	2,51027	3,06498	5,17493
12	7,97302	16,70877	2,59347	3,05860	5,22984
13	5,32826	11,85245	2,65514	3,05530	5,28960
14	2,73041	7,05240	2,73803	3,04382	5,34818
15	0,09194	2,18782	2,82260	3,06862	5,40864

3.1. Pressão estática corrigida

O valores de diferença de pressão estática Δp entre as posições (1) e (2) e da pressão dinâmica q_1 na posição (1) são relacionados através de uma regressão de mínimos quadrados:

$$\Delta p = -1,881 - 0,024 q_1 \tag{15}$$

com desvio padrão da regressão $S_{\Delta p}$ igual a 2,334 Pa

A pressão estática corrigida p_{corrig} , é igual à pressão estática p_1 lida na posição (1) durante o ensaio, acrescida de uma correção, que corresponde à diferença de pressão estática Δp obtida da regressão expressa pela Eq. (15):

$$p_{corrig} = p_1 + \Delta p \tag{16}$$

Durante o ensaio, foi observada a leitura de pressão dinâmica q_1 igual a 2941,995 Pa, e a pressão estática p_1 igual a 94762,503 Pa. Usando as Eq. (15) e (16), obtém-se a correção da pressão estática na posição (2):

$$p_{corrig} = 94671,759 Pa, \text{ com incerteza padrão combinada igual a } 1,9 \times 10^{-2} Pa.$$

3.2. Pressão total

A pressão total calculada a partir do valor corrigido da pressão estática é, segundo a Eq. (1):

$p_t = 97613,754 \text{ Pa}$, com incerteza $1,9 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ de acordo com a Eq. (9). Verifica-se a predominância da incerteza na medição da pressão estática (componente u_p da Eq. (9)), em relação à incerteza da pressão dinâmica u_q , que corresponde à incerteza de calibração do sensor.

Assumindo a indicação do sensor de pressão colocado na parede superior da seção de ensaio, temos para a pressão total o valor $97704,498 \text{ Pa}$, que difere 0,1% do valor $97613,754 \text{ Pa}$, que foi calculado considerando-se a correção da pressão estática.

3.3. Massa específica

Pela Eq. (2), a massa específica do escoamento, usando a pressão estática corrigida, é:

$$\rho = 1,106 \text{ kg/m}^3, \text{ com incerteza padrão combinada } u_p = 0,003 \text{ kg/m}^3$$

Sem a correção da pressão estática, o valor da massa específica seria igual a $1,107 \text{ kg/m}^3$, uma diferença em torno de 0,1 %.

3.4. Velocidade do escoamento

A velocidade do escoamento, de acordo com a Eq. (3), é:

$$V = 72,944 \text{ m/s}$$

Pela Eq. (12), a incerteza na velocidade corresponde a $0,13 \text{ m/s}$.

O valor da velocidade torna-se $72,909 \text{ m/s}$ para cálculo sem a correção da pressão estática, representando uma variação de 0,05 %.

3.5. Número de Mach

O número de Mach é calculado a partir das Equações (4) e (5). Para uma temperatura $T = 300,22 \text{ K}$, a velocidade do som no ar torna-se:

$$a = 346,2016 \text{ m/s}, \text{ para } R = 285,157 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$$

Portanto:

$$M = 0,2107, \text{ com incerteza } 0,0008.$$

Para o número de algarismos significativos aqui apresentado, há uma diferença de 0,05% entre o número de Mach corrigido ($0,2107$) e o não corrigido ($0,2106$).

Esta comparação de parâmetros de escoamento para a correção da pressão estática foi realizada também para velocidade de escoamento maior, o que é mostrado na Tab. (2).

Tabela 2: diferenças entre os valores dos parâmetros do escoamento corrigidos e não corrigidos, para duas situações de regime de escoamento. Unidades no SI.

	Pressão dinâmica 2941,995			Pressão dinâmica 5883,990		
	não corrigido	corrigido	diferença %	não corrigido	corrigido	diferença %
pressão estática	94762,503	94671,759	0,1	94464,859	94301,817	0,2
pressão total	97704,498	97613,754	0,1	100348,849	100185,807	0,2
massa específica	1,107	1,106	0,1	1,103	1,101	0,2
velocidade	72,909	72,944	0,05	103,282	103,372	0,09
Mach	0,2106	0,2107	0,05	0,2983	0,2986	0,10

4. Conclusões

Uma fonte de erro foi identificada nos ensaios do túnel de vento TA-2, que consiste na não uniformidade da pressão estática. Foi proposta uma correção, relacionando a pressão estática indicada pelo sensor durante o ensaio e a diferença de pressão estática entre as posições determinadas pela localização do modelo e da parede superior do túnel. Esta correção foi aplicada aos parâmetros pressão estática p , pressão total p_t , massa específica ρ , velocidade V e número de Mach M , tendo sido considerada a incerteza desta correção na avaliação de incerteza das grandezas medidas e calculadas.

Os erros, em porcentagem, entre parâmetros corrigidos e não corrigidos estão apresentados na Tab. (2). As diferenças ficam mais acentuadas à medida que se incrementa a velocidade do vento. Por exemplo, quando não se aplica a correção da pressão estática, um aumento da velocidade do escoamento torna maior o erro no número de Mach, ou seja, o erro passa de 0,05 para 0,10 %.

Identificação de fontes de erro em ensaios em túnel de vento possibilitam a correção das grandezas medidas. A avaliação de incertezas fornece informações que ajudam o aerodinamicista a planejar o experimento de acordo com os pré-requisitos estabelecidos pelo usuário. O comprometimento do resultado da medição depende dos níveis de exatidão e de incerteza exigidos pelo ensaio.

Deve-se observar que a correção considerada neste trabalho deve também ser efetuada para a pressão dinâmica e para a temperatura, ou seja, deve-se relacionar a pressão dinâmica e a temperatura na posição do modelo com a posição onde está localizado o sensor numa situação de ensaio.

5. Referências Bibliográficas

- Anderson, J. D., 1984, "Introduction to Flight", New York: MacGraw-Hill Book Company, 3.ed, 616 p.
- Benedict, R. P., 1977, "Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements", New York John Wiley. and Sons, 2ed, 517p.
- Bureau International des Poids et Mesures, International Electrotechnical Commission, International Federation of Clinical Chemistry, International Organization for Standardization, International Union of Pure and Applied Chemistry, International Union of Pure and Applied Physics, International Organization of Legal Metrology, 1995, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements", 101p.
- Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, Rio de Janeiro, 1995, Portaria Nº 29 de 10 de março de 1995, "Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia", 52p.
- Owen F. K., 2000, "Wind Tunnel Flow Quality: Retrospect and Prospect", AIAA 2000-0288, 38th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 10-13 Jan. 2000, Reno, NV.
- Reis M. L. C. C., 2000, "Expressão da Incerteza da Medição Associada a um Ensaio Aeronáutico em Túnel de Vento Subsônico", Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, out. de 2000, 103 p.
- Reis M. L. C. C., Novaski O., Mello O. A. F., Matsuo C., 2000, "Incerteza da Medição de um Ensaio em Túnel de Vento Subsônico", Anais do Metrologia2000, 4 - 7 dez. de 2000, São Paulo, pp. 70- 79.

ASSESSMENT OF UNCERTAINTY IN THE STATIC AND DYNAMIC PRESSURE CORRECTIONS IN A WIND TUNNEL TEST

Maria Luísa Collucci da Costa Reis

Aerospace Technical Center
Institute of Aeronautics and Space
Praça Mal. Eduardo Gomes, nº 50

São José dos Campos, São Paulo
12228-904
mluisareis@bol.com.br

Olympio Achilles de Faria Mello
Aerospace Technical Center
Institute of Aeronautics and Space
Praça Mal. Eduardo Gomes, nº 50
São José dos Campos, São Paulo
12228-904
oamello@directnet.com.br

Matsuo Chisaki
Aerospace Technical Center
Institute of Aeronautics and Space
Praça Mal. Eduardo Gomes, nº 50
São José dos Campos, São Paulo
12228-904
matsuo@iae.cta.br

***Abstract.** The static pressure p at the subsonic Wind Tunnel of the Aerodynamic Testing Laboratory of the Institute of Aeronautics and Space – IAE, Aerospace Technical Center – CTA, is measured using an absolute pressure sensor, located at the upper test section wall. This measurement is not taken at the same location as the one where the model is mounted during the actual wind tunnel test. This fact raises the need for a correction during data reduction. The identification and evaluation of the associated error source is important because the static pressure is an input quantity for the computation of the total pressure p_t , Mach number M and density ρ during the test. The present paper is concerned with the determination of the relationship between the static pressure at the tunnel's upper wall and the static pressure at the model location, and with the analysis of the uncertainty propagation for the measured flow parameters.*

Keywords: flow quality, uncertainty in measurement, wind tunnel tests.