



## **INCERTEZA DA CALIBRAÇÃO DE UMA BALANÇA DE SEIS COMPONENTES UTILIZADA EM ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO**

### **Maria Luísa Collucci da Costa Reis**

Centro Técnico Aeroespacial, Instituto de Fomento e Coordenação Industrial  
Praça Mal. Eduardo Gomes, 50, São José dos Campos, São Paulo, Brasil, CEP 12231-970  
Fone: (0055)(+12) 347-5148, Fax: (0055)(+12) 341-4722, marialc@iconet.com.br

### **Olívo Novaski**

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica  
Caixa Postal 6122, Campinas, São Paulo, Brasil, CEP 13083-970  
Fone (0055)(+19) 788-8510, Fax (0055)(+12) 289-3722, novaski@fem.unicamp.br

### **Olympio Aquilles de Faria Mello**

### **Sadahaki Uyeno**

### **Oswaldo Saback Sampaio**

Centro Técnico Aeroespacial, Instituto de Aeronáutica e Espaço  
Praça Mal. Eduardo Gomes, 50, São José dos Campos, São Paulo, Brasil, CEP 12228-904  
Fone: (0055)(+12) 347-6557, Fax (0055)(+12) 347-6505, oamello@iae.cta.br

**Resumo.** *Descreve-se um método para estimação da incerteza em medições de um ensaio no Túnel de Vento Subsônico TA-2 do Centro Técnico Aeroespacial – CTA, Brasil. O formalismo empregado é o recomendado por organizações metrológicas internacionais. É apresentado o procedimento de calibração da balança multicomponente que consiste em empregar o método de regressão multivariada. As componentes da incerteza padrão resultantes do ajuste de curva da calibração são posteriormente empregadas para estimar as incertezas das forças e momentos atuantes no modelo que está sendo submetido ao ensaio aerodinâmico. É feita uma comparação entre o método aqui proposto e o utilizado atualmente no TA-2.*

**Palavras-chave:** *Ensaio em Túnel de Vento, Incerteza da Medição, Calibração de Balança Multicomponente.*

## **1. INTRODUÇÃO**

Ensaio em túnel de vento fornecem informações que irão contribuir na previsão de desempenho de aeronaves, automóveis e submarinos, e da estabilidade de várias estruturas na construção civil tais como edifícios, pontes, viadutos e plataformas de petróleo. A

qualidade dos dados depende do projeto, da execução, da identificação das fontes de erro e da análise da incerteza dos ensaios. Face a isto, a Subdivisão de Aerodinâmica (ASA-L), do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), do Centro Técnico Aeroespacial (CTA), de São José dos Campos, São Paulo, Brasil, propôs um trabalho de desenvolvimento de metodologia para cálculo de incerteza da medição em ensaio no Túnel de Vento Subsônico TA-2. A metodologia empregada segue formalismo padronizado, adotado pela comunidade metrológica mundial (BIPM, 1995); o vocabulário utilizado está de acordo com o VIM - Vocabulário Internacional de Metrologia (INMETRO, 1995).

São várias as fontes de erro presentes em ensaios em túnel de vento. Uma lista dos erros até agora identificados não é exaustiva e são discutidos em AIAA (1995), Kammeyer (1998) e Wilcox *et al.* (1998). Um levantamento das fontes de erro e uma estimativa das incertezas dos parâmetros medidos no TA-2 podem ser encontrados em Reis *et al.* (1998).

Os momentos e forças que atuam no modelo ensaiado são medidos a partir de uma balança, cuja calibração contribui em grande parte para a incerteza nos resultados de medição em túnel de vento (Belter, 1998). Organismos ligados a atividades aeroespaciais têm se preocupado com a padronização do cálculo da incerteza das grandezas medidas em ensaios aerodinâmicos (AIAA, 1995). Uma metodologia para determinação das incertezas em medição de balança foi desenvolvida por Tripp *et al.* (1994).

A estimativa adequada e a declaração da incerteza da medição permitem a comparação dos resultados do ensaio e contribuem para a confiabilidade metrológica do Laboratório Aerodinâmico.

## 2. O TÚNEL DE VENTO TA-2

A Figura 1 apresenta o esquema do túnel subsônico número 2 - TA-2, do CTA, com seção de ensaio de dimensão 3,00 por 2,10 metros.

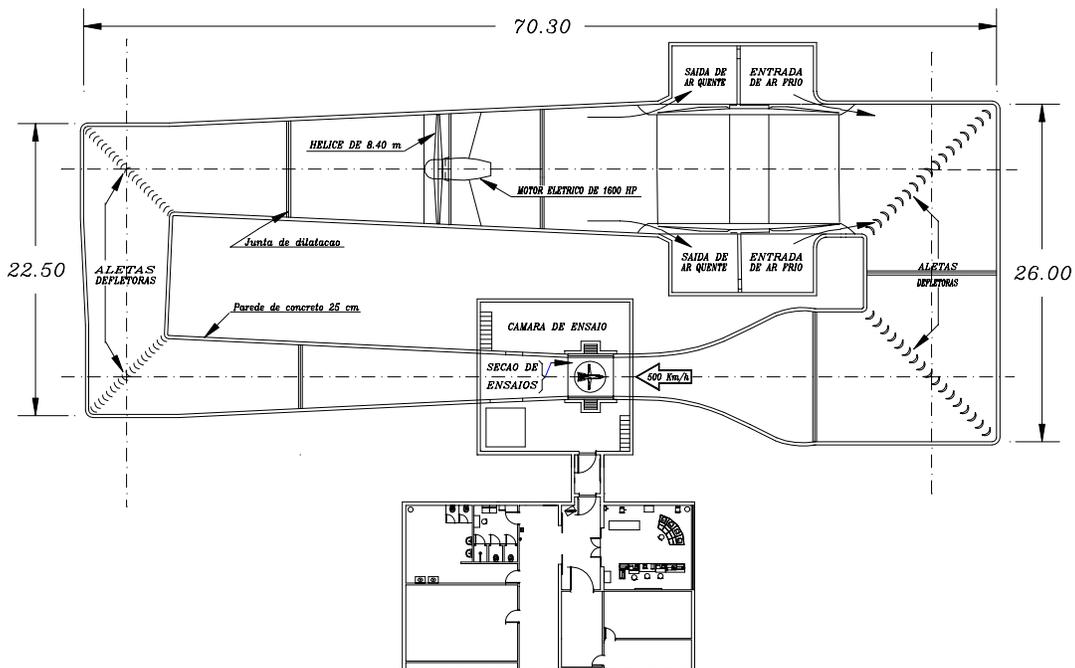


Figura 1: Esquema do túnel de vento TA-2.

Uma balança externa, cuja finalidade é medir as resultantes de forças e momentos aerodinâmicos atuantes sobre o modelo, é mostrada na Fig. 2.

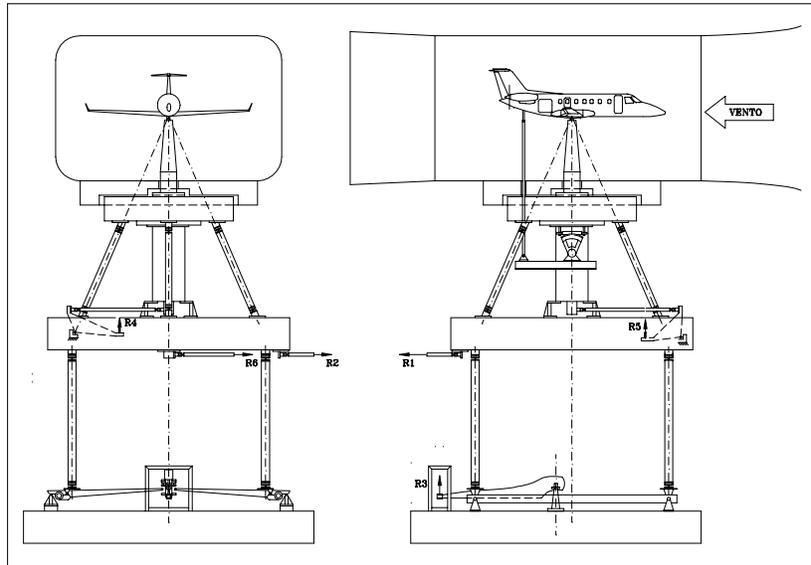


Figura 2: Esquema da balança Taller&Cooper.

As componentes de carga no modelo recebem denominações próprias, como mostrado na Fig. 3. É utilizado um sistema cartesiano de 3 eixos, onde as resultantes de força e momento são identificadas pelas componentes nestes eixos. No TA-2, o ângulo de ataque  $\alpha$  pode variar na faixa de  $\pm 30^\circ$  e o ângulo de guinada  $\beta$  de  $\pm 45^\circ$ . Os símbolos representam: D (drag) força de arrasto, Y (yawing) força lateral, L (lifting) força de sustentação, R momento de rolamento, M momento de arfagem, N momento de guinada (Pope, 1984).

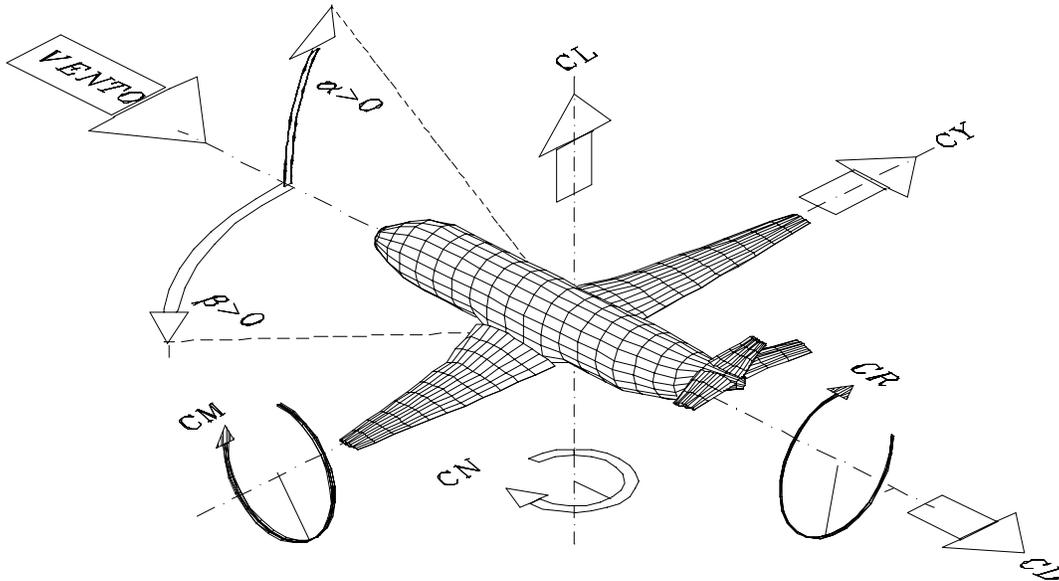


Figura 3: Forças e momentos aerodinâmicos.

### 3. PROPAGAÇÃO DA INCERTEZA

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):

$$Y = \bar{Y} + U \quad (1)$$

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:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2)$$

A incerteza padrão de  $y$ , onde  $y$  é 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  $u_c^2(y)$ , que é dada pela Eq. 3 abaixo, ou seja, é um desvio padrão estimado e caracteriza a dispersão dos valores que poderiam razoavelmente ser atribuídos ao mensurando  $Y$ :

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (3)$$

onde  $u(x_i)$  representa todas as incertezas originadas na medição de  $x_i$ .

Esta expressão é válida para grandezas de entrada não correlacionadas. A equação para incerteza combinada para  $N$  grandezas de entrada correlacionadas é:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{\partial y}{\partial x_j} u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j) \quad (4)$$

A incerteza padrão expandida  $U$ , é obtida multiplicando-se a incerteza padrão combinada pelo fator de cobertura  $k$ , que está associado a um determinado nível de confiança:

$$U = ku(y) \quad (5)$$

### 4. A CALIBRAÇÃO DA BALANÇA

A balança externa de seis componentes mede as cargas  $F_{is}$  ( $i = 1, \dots, 6$ ) atuantes no modelo a ser ensaiado;  $F_1, F_2$  e  $F_3$  são forças, e  $F_4, F_5$  e  $F_6$  são momentos. A balança é do tipo prismática para forças, e piramidal para os momentos.

Efetua-se a calibração da balança através da aplicação de massas a um sistema de cabos e roldanas cuja estrutura é mostrada na Fig. 4 (cruz de calibração).

SISTEMA DE CALIBRAÇÃO DA BALANÇA TALLER & COOPER DO TA-2

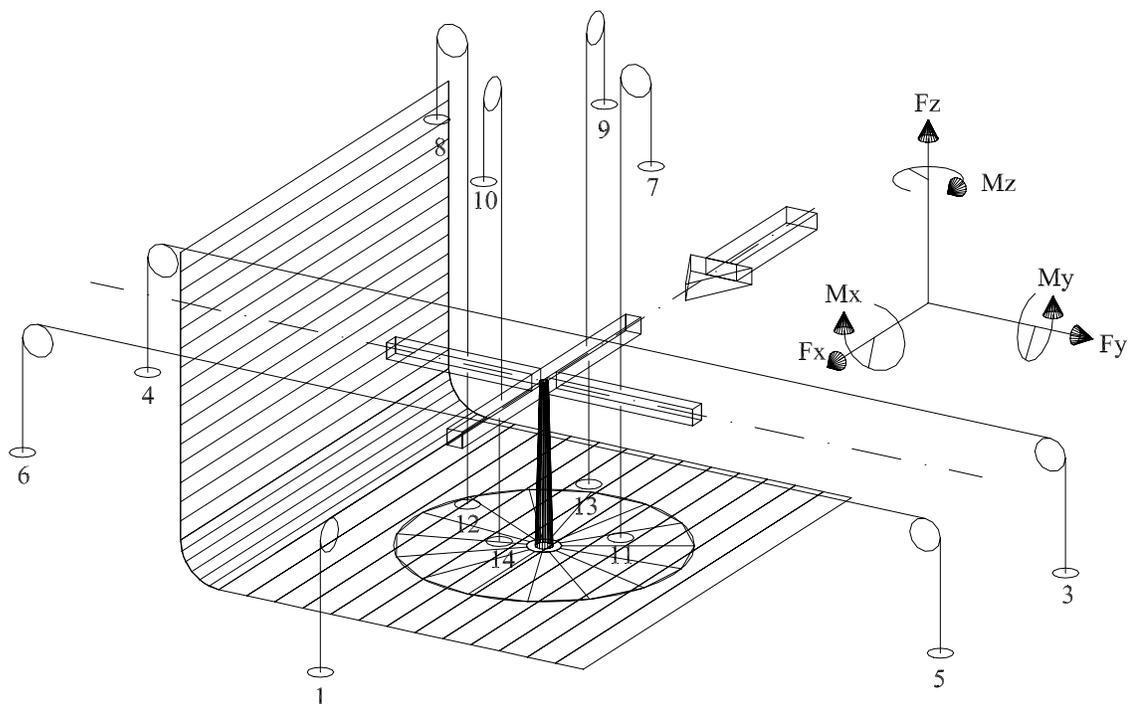


Figura 4: Sistema de aplicação de cargas. F: força; M: momento.

#### 4.1. O carregamento

É utilizado um conjunto de cerca de 100 (cem) massas.

Em geral, para a sustentação temos uma carga máxima de aproximadamente 3.200 N, para o arrasto 1.200 N, e 800 N para a força lateral, o que requer respectivamente 32, 12 e 8 massas de 10 kg. Para a sustentação e força lateral, são necessários carregamentos em ambas as direções para obtenção de sinais positivos e negativos. Neste caso, o número de massas empregadas na calibração totaliza 92 (noventa e dois).

São efetuados 73 (setenta e três) carregamentos para cada ângulo de guinada. A Tabela 1 apresenta alguns carregamentos típicos. Os valores representam as cargas aplicadas. Unidades em newtons para força e newtons.metro para momentos. Os símbolos  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $F_4$ ,  $F_5$  e  $F_6$  são para as forças de arrasto, lateral e de sustentação, e os momentos de rolamento, de arfagem e de guinada, respectivamente.

As cargas  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $F_4$ ,  $F_5$  e  $F_6$  aplicadas no sistema são medidas por seis sensores do tipo célula de carga, que fornecem as leituras  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_5$  e  $R_6$ , lidas diretamente no mostrador da balança. Por exemplo, considerando-se a primeira componente  $F_1$ , há para cada uma das 73 cargas aplicadas em  $F_1$ , as correspondentes leituras  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_5$  e  $R_6$ , totalizando 73 pontos do tipo  $(F_1; R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6)_k$ , com  $k = 1, \dots, 73$ .

Tabela 1. Carregamento da balança Taller&Copper do TA-2, em 9 Dez. 1998.

componentes	Carregamento n°					
	1	26	38	46	60	71
$F_1$ : Força de arrasto	0,0	500,0	0,0	0,0	500,0	1.000,0
$F_2$ : Força lateral	0,0	0,0	-800,0	800,0	0,0	0,0
$F_3$ : Força de sustentação	-2.000,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2.000,0
$F_4$ : Momento de rolamento	0,0	-300,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$F_5$ : Momento de arfagem	-600,0	0,0	0,0	0,0	-600,0	0,0
$F_6$ : Momento de guinada	0,0	0,0	360,0	-360,0	0,0	0,0

#### 4.2. A curva de calibração.

Uma curva de calibração é ajustada a cada conjunto de 73 pontos  $(F_i ; R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6)_k, i = 1, \dots, 6$ . O modelo do ajuste é uma combinação linear de 27 (vinte e sete) funções de  $R$  que são:  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_1^2, R_1R_2, R_1R_3, R_1R_4, R_1R_5, R_1R_6, R_2^2, R_2R_3, R_2R_4, R_2R_5, R_2R_6, R_3^2, R_3R_4, R_3R_5, R_3R_6, R_4^2, R_4R_5, R_4R_6, R_5^2, R_5R_6, R_6^2$  e possui vinte e sete parâmetros ajustáveis  $a_{js} (j = 1, \dots, 27)$  para  $F_1$ , vinte e sete parâmetros ajustáveis  $b_{js}$  para  $F_2$ , e assim por diante, até atingir os parâmetros  $f_{js}$  para  $F_6$ . A representação matricial do modelo do sistema multivariável (múltiplas entradas e múltiplas saídas) é:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{bmatrix}_{6 \times 1} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_{27} \\ b_1 & b_2 & \dots & b_{27} \\ \ddots & & & \\ & \ddots & & \\ & & \ddots & \\ f_1 & f_2 & \dots & f_{27} \end{bmatrix}_{6 \times 27} \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_6 \\ R_1^2 \\ R_1R_2 \\ R_1R_3 \\ \vdots \\ R_5R_6 \\ R_6^2 \end{bmatrix}_{27 \times 1} \quad (6)$$

A dependência do modelo em relação aos parâmetros  $a_{js}, b_{js}, \dots, f_{js}, (j = 1, \dots, 27)$  é linear. As forças aplicadas  $F_{is}$  e as cargas lidas  $R_{is}, (i = 1, \dots, 6)$  são as grandezas de entrada da calibração. Os parâmetros  $a_{js}, b_{js}, \dots, f_{js}$  obtidos no ajuste de curva, são os mensurandos ou grandezas de saída a serem determinados e além de estimá-los, devemos também fornecer uma estimativa de suas variâncias e covariâncias (BIPM, 1995).

#### 4.3. O ajuste de curva

Será considerado o ajuste de curva aos dados correspondentes à componente  $F_1$ .

Os 73 pontos  $(F_1 ; R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6)_k$  serão ajustados ao modelo (Nogueira, 1980):

$$\begin{aligned}
F_1(R) = & a_1R_1 + a_2R_2 + a_3R_3 + a_4R_4 + a_5R_5 + a_6R_6 + a_7R_1^2 + a_8R_1R_2 + a_9R_1R_3 + a_{10}R_1R_4 + \\
& a_{11}R_1R_5 + a_{12}R_1R_6 + a_{13}R_2^2 + a_{14}R_2R_3 + a_{15}R_2R_4 + a_{16}R_2R_5 + a_{17}R_2R_6 + a_{18}R_3^2 + a_{19}R_3R_4 + \\
& a_{20}R_3R_5 + a_{21}R_3R_6 + a_{22}R_4^2 + a_{23}R_4R_5 + a_{24}R_4R_6 + a_{25}R_5^2 + a_{26}R_5R_6 + a_{27}R_6^2
\end{aligned} \tag{7}$$

#### 4.4. Solução do sistema de equações

A estimativa dos 27 parâmetros do modelo ( $a_{js}$ ) é obtida minimizando a quantidade Qui-quadrado definida a seguir (Benvigton, 1969):

$$\chi^2 \equiv \sum_{k=1}^{73} \left[ \frac{F_{1k} - (a_1R_{1k} + a_2R_{2k} + \dots + a_7R_{1k}^2 + \dots + a_{26}R_{5k}R_{6k} + a_{27}R_{6k}^2)}{\sigma_k} \right]^2 \tag{8}$$

onde  $F_{1k}$  é o ponto medido e o parêntese interno é a curva ajustada. A incerteza  $\sigma_k$  ( $k = 1, \dots, 73$ ) associada a cada um dos pontos ( $F_1; R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ )<sub>k</sub> obtidos no carregamento, é considerada igual a 1 para todos os pontos.

É aplicado o método de mínimos quadrados ao conjunto das 73 equações (resultantes dos 73 carregamentos) a 27 incógnitas ( $a_{js}$ ). Os dados são escritos em arranjos matriciais como mostrado a seguir (Werkema & Aguiar, 1996).

Etapa 1: Monta-se a matriz  $[R]_{73 \times 27}$ , chamada matriz design (Press *et al.*, 1992), constituída dos valores das leituras nas seis células de carga da balança. As primeiras seis colunas da matriz  $[R]$  são os valores indicados em  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ ; as demais colunas são fornecidas pelas combinações  $R_1R_1, R_1R_2, R_1R_3, \dots, R_1R_6; R_2R_2, R_2R_3, \dots, R_2R_6; R_3R_3, R_3R_4, \dots, R_3R_6; R_4R_4, R_4R_5, R_4R_6; R_5R_5, R_5R_6$  e  $R_6R_6$ . Todos os elementos desta matriz são divididos pelos  $\sigma_{ks}$  correspondentes, aqui considerados iguais a 1. Os valores da força  $F_1$  aplicados na cruz de calibração são arrançados numa matriz  $[F]_{73 \times 1}$ ;

Etapa 2: Calcula-se a matriz  $[R]^t$  (transposta da matriz  $[R]$ ) e efetua-se  $[R]^t[R]$  e  $[R]^t[F]$ ;

Etapa 3: Calcula-se a matriz  $[a]_{27 \times 1}$  dos parâmetros  $a_1, a_2, \dots, a_{27}$ , por meio da expressão:

$$[a] = \left[ [R]^t[R] \right]^{-1} [R]^t[F] \tag{9}$$

#### 4.5. A estimativa das variâncias e covariâncias dos parâmetros ajustáveis

É necessário encontrar a incerteza nos coeficientes  $a_{js}$  ( $j=1, \dots, 27$ ) do procedimento de ajuste, uma vez que os erros de medição nos pontos ( $F_1; R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ ) introduzem incertezas na determinação destes parâmetros.

Por não serem conhecidas as incertezas nos pontos, os valores de  $\sigma_{ks}$  são considerados iguais a 1 na matriz design. Desta maneira, as incertezas nos pontos podem ser estimadas do ajuste de mínimos quadrados a partir da raiz quadrada positiva da equação abaixo (Benvigton, 1969):

$$\sigma_k^2 = \sigma^2 \cong S^2 = \frac{1}{N-n-1} \sum_{k=1}^{73} \left\{ F_{1_k} - (a_1 R_{1_k} + a_2 R_{2_k} + \dots + a_{27} R_{6_k}^2) \right\}^2 \quad (10)$$

onde  $S^2$  é a variância amostral do ajuste e  $\nu = N-n-1$  é o número de graus de liberdade após ajustar os 73 pontos com os 27 parâmetros.

A matriz inversa  $[[R]^t[R]]^{-1}$  é chamada matriz erro  $\varepsilon$  pois está relacionada às incertezas dos parâmetros estimados  $a_{js}$  (Press *et al.*, 1992). Os elementos da diagonal da matriz erro  $\varepsilon_{jj}$  são multiplicados pela variância amostral (Eq. 10) para fornecerem as incertezas dos coeficientes:

$$u^2(a_j) = S^2 \varepsilon_{jj} \quad (11)$$

Os elementos fora da diagonal da matriz erro fornecem as covariâncias entre os parâmetros

## 5. INCERTEZA DO VALOR AJUSTADO

Aplicação da lei da propagação da incerteza às equações que representam as curvas ajustadas leva à incerteza padrão combinada dos valores  $F_{is}$  previstos pelo ajuste, para quaisquer valores  $R_{is}$  de leituras. A equação para incerteza combinada para  $N$  grandezas de entrada correlacionadas é dada pela Eq. 4, que aplicada à Eq. 7 fornece a seguinte expressão para a incerteza combinada para a força  $F_I$ :

$$u_c^2(F_I) = \left( \frac{\partial F_I}{\partial a_1} \right)^2 u^2(a_1) + \left( \frac{\partial F_I}{\partial a_2} \right)^2 u^2(a_2) + \dots + \left( \frac{\partial F_I}{\partial a_{27}} \right)^2 u^2(a_{27}) + 2 \sum_{j=1}^{26} \sum_{l=j+1}^{27} \frac{\partial F_I}{\partial a_j} \frac{\partial F_I}{\partial a_l} u(a_j) u(a_l) r(a_j, a_l) \quad (12)$$

As incertezas nos parâmetros ajustáveis  $u^2(a_j)$ , e as covariâncias  $r(a_j, a_l)$  são fornecidas pela matriz  $[[R]^t[R]]^{-1}$  e pelas Equações 10 e 11, como discutido na seção 4.5.

## 6. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Cinco conjuntos de leituras nas seis células de carga  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ , são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Cinco exemplos de valores lidos nas células de carga. Unidades em mV.

Exemplo	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$
1	-0,14	0,12	-107,35	3,62	-126,39	0,30
2	-156,80	-0,40	-0,32	66,63	-0,80	1,07
3	0,07	332,02	0,48	-0,73	1,73	207,82
4	-157,68	-0,32	-0,03	-0,97	-125,56	1,03
5	-317,57	-1,15	107,30	-5,03	-1,16	1,94

Na Tabela 3 estão os resultados da aplicação do método aqui proposto para a estimativa da força de arrasto e da correspondente incerteza, para os cinco conjuntos de leituras apresentados na Tabela 2. O valor da carga é estimado através da regressão de mínimos quadrados. A incerteza  $u_{F1}$  é obtida através da aplicação da Eq. 12 para  $F_1$ . A última coluna representa a incerteza estimada pelo método já existente no laboratório aerodinâmico ASA-L, que corresponde à raiz quadrada positiva da Eq. 10.

Tabela 3. Resultados do ajuste de curva e da incerteza da calibração da balança. Unidades de força, desvio padrão e incerteza em newtons.

Carga e incerteza	conjunto					desvio padrão
	1	2	3	4	5	
$F_1$	0,77	496,67	0,125	498,70	1001,4	
$u_{F1}$	1,4	1,7	1,6	1,7	4,0	1,99

A partir da Tabela 3, observa-se que a incerteza na força de arrasto  $u_{F1}$ , declarada de acordo com o método já existente no laboratório aerodinâmico, que consiste no valor do desvio padrão do ajuste aos pontos do carregamento, permanece inalterada com a variação nas leituras das células de carga. Ou seja, independentemente de quais sejam as leituras nos sensores da balança no ensaio aerodinâmico, a incerteza na força de arrasto é sempre igual ao desvio padrão obtido na fase de calibração da balança. A aplicação da metodologia apresentada neste trabalho, resulta em incertezas que dependem, além do desvio padrão da calibração da balança, das leituras dos sensores da balança no momento do ensaio.

## 7. CONCLUSÕES

A incerteza na força de arrasto  $u_{F1}$  declarada na Tabela 3 representa um valor estimado a partir da determinação das incertezas dos coeficientes  $a_{js}$  do ajuste de mínimos quadrados, onde as incertezas  $\sigma_{ks}$  nos pontos ajustados não são conhecidas. Para estimar o valor da incerteza nos pontos, é necessário realizar uma série de repetições com o mesmo carregamento, o que consome tempo e conseqüentemente aumenta o custo do ensaio no túnel de vento. Portanto, todos os 73 valores  $\sigma_{ks}$  foram considerados iguais a 1 e foi utilizada a variância amostral como aproximação da incerteza nos pontos.

Deve-se ter em mente que a incerteza  $u_{F1}$  apresentada na Tabela 3 é apenas uma das componentes da incerteza final da medição da força de arrasto que atua no modelo. Por exemplo, uma componente de incerteza que deve também ser considerada é a originada pela força de atrito entre as roldanas e os cabos que fazem parte do sistema de calibração da balança.

Metodologia e padronização da calibração de balança têm sido uma preocupação entre profissionais ligados a ensaios em túnel de vento, quanto ao aspecto de número de carregamento, modelamento, avaliação de fontes de erro e cálculo da incerteza.

São muitas as grandezas medidas em ensaios em túnel de vento. Trabalhos devem ser conduzidos no TA-2, no sentido de avaliar a contribuição para a incerteza do alinhamento dos cabos e atritos das roldanas no processo de calibração da balança, do sistema de aquisição de dados e do efeito dinâmico das vibrações ocasionadas pela presença do vento.

## REFERÊNCIAS

- American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1995, Assessment of Wind Tunnel Data Uncertainty, AIAA S-071
- Belter, D. L., 1998, Comparison of Wind Tunnel data Repeatability with Uncertainty Analysis Estimates, AIAA-98-2714, 20<sup>th</sup> AIAA Advanced Measurement and Ground Testing Technology Conference, Jun 15-18, Albuquerque, Novo México.
- BIPM, IEC, IFCC,ISO, IUPAP,OIML, 1995. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements.
- Bevington, P. R., 1969, Data Redution and Analysis for the Physical Sciences, McGraw-Hill Book Company.
- INMETRO, 1995, Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia, Portaria nº 029 de 10 de Março.
- Kammeyer, M. E., 1998, Wind Tunnel Facility Calibrations and Experimental Uncertainty, AIAA-98-2715, 20<sup>th</sup> AIAA Advanced Measurement and Ground Testing Technology Conference, Jun 15-18, Albuquerque, Novo México.
- Nogueira, S. L., 1980, Calibração de Sistemas de Medidas d múltiplas Componentes com Interações, Tese de Mestrado, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, Centro Técnico Aeroespacial.
- Pope, A., Harper, J. J. , 1984, Low-Speed Wind Tunnel Testing, John Wiley & Sons.
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., Flannery, B. P., 1992, Numerical Recipes, Cambridge University Press.
- Reis, M. L. C. C., Novaski, O., 1998, Incerteza da Medição em Túnel de Vento, 8<sup>o</sup> Congresso Chileno de Engenharia Mecânica, Concepción, Chile.
- Tripp, J. S., Tchong, P., 1994, Determination of Measurement Uncertainties of Multi-Component Wind Tunnel Balances, AIAA-94-2589, 18<sup>th</sup> AIAA Aerospace Ground Testing Conference, Jun 20-23, Colorado Springs, Colorado.
- Werkema, M. C. C. & Aguiar, S., 1996, Análise de Regressão: Como Entender o Relacionamento entre as Variáveis de um Processo, TQC, Fundação Christiano Ottoni.
- Wilcox, R. A., Lockwood, T. C., 1998, Wind Tunnel Balance Behavior, A98-31001 08-35, 44<sup>th</sup> International Instrumentation Symposium, May 3-7, Reno, NV.

### UNCERTAINTY OF THE CALIBRATION OF A SIX-COMPONENT BALANCE EMPLOYED IN WIND TUNNEL TESTS

*Abstract. This paper describes a method for the estimation of uncertainty in measurements of a test at the Subsonic Wind Tunnel TA-2 at the Aerospace Technical Center - CTA, Brazil. The methodology employed is that recommended by the international metrological organizations. The calibration procedure of the multi-component balance which employs multivariate regression is presented. The standard uncertainty components resulting from the curve fit, are later used to estimate the uncertainty in forces and moments acting on the model which is being submitted to the aerodynamic test. A comparison is made here between the method proposed and that in use in TA-2.*

**Keywords:** *Wind Tunnel Tests, Uncertainty in Measurement, Calibration of Multi-Component Balance.*