MODELAGEM POLINOMIAL DE 1º GRAU DA MEDIÇÃO DE ESFORÇOS PARA ENSAIOS AERODINÂMICOS

FIRST DEGREE POLYNOMIAL FITTING FOR FORCES AND MOMENTS ON THE AERODYNAMIC TEST MODEL

BARBOSA, Itamar Magno¹; SISMANOGLU, Bogos Nubar²; OLIVEIRA, Pedro Ivo Pinto³

¹Instituto de Fomento e Coordenação Industrial – IFI, Pça Marechal Eduardo Gomes N50, CEP 12228-901, São José dos Campos – SP, Brasil. (fone: +55 11 39477141)

²Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, Pça Marechal Eduardo Gomes N50, CEP 12228-901, São José dos Campos – SP, Brasil. (fone: +55 11 39477141)

³Instituto de Aeronáutica e Espaço – IAE, Pça Marechal Eduardo Gomes N50, CEP 12228-901, São José dos Campos – SP, Brasil. (fone: +55 11 39477141)

* Autor correspondente
e-mail: magnoimb@ifi.cta.br

Received 17 November 2016; received in revised form 12 December 2016; accepted 15 December 2016

RESUMO

Um delineamento de experimentos foi efetuado para analisar a proposta de modelos polinomiais multivariados a fim de representar a Curva de Calibração de uma Balança Dinamométrica Externa de Esforços Aerodinâmicos. Conforme a ISO 17025, nem sempre é possível o cálculo rigoroso da incerteza de medição nesses tipos de laboratórios. A natureza do ensaio, que por vezes limita o controle das fontes de erros, tempo e custos, implica que escolher uma Modelagem Matemática de referência plausível é também uma questão de gestão de produtividade do Laboratório de Ensaios, não sendo somente uma questão computacional. Para uma Modelagem Matemática através de polinômios de primeiro grau, foram avaliados os Indicadores de Desempenho Estatísticos, tais como Tendências, Desvio Padrão do Ajuste e Qui – Quadrado Reduzido, Matrizes de Co-Variâncias e Incertezas. Através de campanhas de calibração semelhantes, foi traçado um paralelo para verificação da repetitividade do sistema de medição. Verificamos quais esforços e em que condições de incertezas e erros as variáveis podem ser separadas. Verificação semelhante foi efetuada também para a tendência de erro (tara), ou seja, avaliação de quando o polinômio pode ou não passar pela origem.

Palavras-chave: Declaração da Incerteza de Medição, Modelagem Matemática, Metrologia Aeroespacial

ABSTRACT

We analyzed a multivariate polynomial model related to Calibration Curve of an External Balance of Aerodynamic Forces. The ISO 17025 explicit that it is not always possible to calculate rigorously the measurement uncertainty in Test Laboratories. The test nature circumscribes error sources control, time and costs. This fact implies that choosing a Mathematical Modeling is also an affair of productivity management, not only a computational matter. For a First Degree Polynomial Modeling we evaluated the Statistical Performance Index, as to Measurement Bias, Standard Uncertainty, X – Square and Uncertainties and Co – Variances Matrix. We evaluated the Measurement System Repeatability through successive resembling Calibrations. We showed Aerodynamic Forces that may be considered individual ones trough uncertainties and systematic errors. In the same way, bias was verified through systematic error analysis, i. e., in what conditions the polynomial intersects at the origin or not.

Key - Words: Measurement Uncertainty, Mathematical Modeling, Aerospace Metrology

INTRODUÇÃO

Em geral, os Laboratórios de Ensaios apresentam maior dificuldade no cálculo da incerteza (BIPM *et al*, 2008) comparado aos Laboratórios de Calibração onde temos condições controladas do Mensurando e das fontes de incerteza, a presença constante de um padrão e modelos matemáticos consolidados. Como citado na ISO 17025, “a natureza do ensaio pode impedir o cálculo rigoroso, metrológica e estatisticamente válido da incerteza de medição”. Um possível caminho a seguir então é contabilizar níveis máximos de erros sistemáticos e aleatórios, mediante a demanda e necessidade do cliente do ensaio.

Figura 1. Seção de ensaio do Túnel de Vento Gentileza do Instituto de Aeronáutica e Espaço – IAE

O laboratório de ensaio aqui trabalhado é o Túnel de Vento para ensaios aerodinâmicos do Instituto de Aeronáutica e Espaço – IAE (Figura 1). O sistema de medição principal é uma Balança Dinamométrica Externa de Esforços Aerodinâmicos.

No ato do ensaio necessita-se de uma Curva de Calibração para extrair os valores dos esforços aerodinâmicos, Grandezas de Forças e Momentos, a partir de leituras de Células de Carga, Grandeza de Diferenças de Potencial (ddp). Dentre a diversidade de modelos matemáticos que podem ser utilizados (Calibration, 1995), neste trabalho escolheu-se o modelo com dependência proporcional e que possa possuir alguma influência cruzada entre sensores. A escolha decorre dos fatos que (i) a construção da balança propicia a dependência

entre grandezas de forma linear preponderantemente, (ii) durante o período de calibrações e ensaios, frequentemente há a necessidade de verificações metrológicas rápidas e (iii) por vezes, as verificações ou mesmo calibrações são efetuadas em menos do que seis esforços e integrada novamente à Curva de Calibração original, definida numa calibração mais minuciosa com tempo apropriado de ociosidade do laboratório para os ensaios de rotina. Portanto, neste caso, utilizar o modelo mais simples para a Curva de Calibração não se trata somente de uma simplificação de cálculo computacional, mas de uma questão de produtividade dos serviços de ensaios prestados.

1.1. Os Esforços Aerodinâmicos:

São seis os esforços aerodinâmicos medidos pela balança externa, três forças e três momentos os quais representam o mensurando.

A terminologia aqui empregada para esses esforços aerodinâmicos é: Força Axial ou de Arrasto (F1), Força lateral (F2), Força Normal ou de Sustentação (F3), Momento de Rolagem (F4), Momento de Arfagem (F5) e Momento de Guinada (F6).

1.2. A Balança Dinamométrica Externa de Esforços Aerodinâmicos

A balança externa utilizada neste estudo pertence à divisão de aerodinâmica do Instituto de Aeronáutica e Espaço – IAE (Fig. 1). Não somente é externa ao modelo como também é externa à seção de ensaio, um mastro engata o modelo disposto na seção de ensaio ao topo da balança (Figura 1 e Figura 2).

As leituras dos esforços aplicados no mastro da balança são capturadas por seis sensores do tipo células de carga (denominados R1 a R6) e a indicação se realiza através de uma grandeza diferente do mensurado, a diferença de potencial elétrico (ddp). Esse fato configura uma medição indireta do mensurando e, independente de outros fatores, necessita a expressão de uma Curva de Calibração que relacione essas grandezas para que, a partir das leituras de ddp, chegue-se aos valores de forças e momentos.

Quanto à sua construção mecânica, é uma balança do tipo piramidal que visa separar os esforços aerodinâmicos. Se essa separação fosse absoluta, cada sensor seria dedicado a

cada esforço aerodinâmico e a Curva de Calibração poderia ser unidimensional. Contudo, a disposição dos tirantes, os quais engastam a balança nos sensores, e os desalinhamentos mecânicos, acabam por correlacionar as leituras efetuadas por alguns dos sensores. Daí a necessidade da Curva de Calibração, independente de outros fatores, ser multivariada para determinados níveis de erros sistemáticos e aleatórios (representada pelo polinômio multivariado neste caso). Contudo, dependendo do nível de incerteza aceitos para o ensaio certas correlações não necessitam ser computadas, então o modelo matemático pode ser simplificado mais ainda para alguns esforços aerodinâmicos.

Figura 2. A Balança Dinamométrica de Esforços Aerodinâmicos. O mastro superior adentra na seção de ensaio (Figura 1). Gentileza do Instituto de Aeronáutica e Espaço - IAE

2. MÉTODOS

2.1. A Calibração da Balança Externa

A calibração em todos os componentes da balança é executada antes e de forma periódica e serve para expressar a Curva de Calibração bem como estimar as incertezas combinadas devido a esse processo. Acrescidamente, verificações simplificadas são efetuadas entre os períodos de calibrações. Para realizar as calibrações, são empregadas massas em pratos fixados em cabos que, através de polias, exercem esforços numa cruz de calibração que está no lugar do modelo de ensaio. Conhecendo-se o valor da aceleração da gravidade e do comprimento dos braços da cruz de calibração, se conhece os valores das forças e momentos aplicados na balança.

Das estratégias para se efetuar a calibração da balança, as duas mais importantes são: a estratégia espacial e a estratégia amostral. Quanto à estratégia espacial, a calibração pode ser efetuada em diversos ângulos de guinada, arfagem ou rolamento. Já a estratégia amostral trata dos valores e das combinações de esforços que podem ser aplicados à cruz de calibração. Tendo como referência a direção do vento e suas normais ortonormais, uma calibração efetuada quando todos os três ângulos são igualados a zero é denominada calibração alfa, e foi a calibração estudada neste artigo.

Quanto à estratégia amostral, de longa data na divisão de aerodinâmica do IAE, são aplicadas cargas de massas para formar cada força ou momento individualmente ou são aplicadas massas para formar forças e momentos aos pares, perfazendo 73 vetores (ou combinações) de medição onde cada um deles (ou delas) que aqui chamaremos de carregamento.

2.2. A Curva de Calibração

A Curva de Calibração é obtida primeiramente de um modelo matemático. Esse modelo é o objeto em análise deste trabalho, o ponto focal deste artigo. Foi escolhido um polinômio multivariado de primeiro grau que não passa pela origem Eq.(1).

$$F_i = \sum_{j=0}^6 a_{i,j} R_j \quad (1)$$

O sistema é representado por uma combinação linear sete (7) funções de R 's, Eq. (1). Essas funções são por vezes denominadas funções de base e correspondem a: 1, R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 , R_6 . São 7 parâmetros a serem ajustados para cada um dos 6 esforços aerodinâmicos F 's. Por ser um polinômio, a dependência em a é linear.

2.3. A Estimação dos Parâmetros

Utilizando o MMQ (Press *et al*, 1992) para estimar os valores numéricos dos parâmetros da Curva de Calibração são utilizadas de 73 combinações de medição

(carregamentos ou pontos medidos). Iniciamos contabilizando cada um desses carregamentos, ou seja, os valores dos esforços aplicados e cada uma das leituras das células de carga em prol de estimarmos os valores dos parâmetros. Lembrando que são 7 funções de base e, portanto, 7 parâmetros a serem determinados, nós temos, para cada um dos esforços aerodinâmicos, um vetor F com dimensão 73×1 cujos elementos representam o valor do respectivo esforço aerodinâmico em cada carregamento. A matriz projeto R , contém os valores numéricos das funções base, com dimensão 73×7 , ou seja, os valores de cada função de base em cada um dos carregamentos. A princípio, a matriz de covariâncias V utilizada neste trabalho será a matriz identidade, ou seja as incertezas igualadas a um (1) e covariâncias a zero (0), tal como seria utilizado por desconhecimento dos valores das incertezas nas medições efetuadas. Denotando por $\hat{a}$ o vetor de valores dos parâmetros da Curva de Calibração, o MMQ ponderado pelas variâncias (e covariâncias), matriz V , resulta em (Helene, 2006):

$$\hat{a} = (R^T \cdot V^{-1} \cdot R)^{-1} \cdot (R^T \cdot V^{-1} \cdot F) \quad (2)$$

R^T : Transposta da matriz projeto R ;

V^{-1} : Inversa da Matriz de Covariância V .

Note que a matriz de Covariâncias V pode ser retirada da Eq. (2) por ser uma matriz identidade. A escolha da matriz identidade neste caso foi utilizada por considerarmos as incertezas e covariâncias dos esforços e das leituras de ddp's desconhecidas a princípio. Um importante fato neste caso é que o desvio padrão do ajuste, dado pela raiz quadrada da Eq.(3), pode ser considerado uma estimativa de incerteza nos valores de saída da Eq.(1).

$$S^2 = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^N (F_{i \text{ fitted}} - F_{i \text{ applied}})^2 \quad (3)$$

$$V_{\hat{p}}$$

A matriz de covariâncias dos parâmetros ajustados é dada pela Eq. (4), ou seja, os elementos de sua diagonal são as variâncias dos parâmetros e os demais elementos as covariâncias, então ela pode ser denotada por e possui dimensão 7×7 neste trabalho.

$$V_{\hat{p}} = S^2 \cdot (R^T \cdot V^{-1} \cdot R)^{-1} \quad (4)$$

2.4. A Qualidade do Ajuste

A qualidade do ajuste é avaliada pela quantidade conhecida como qui-quadrado, χ^2 , definida como (Bevington, 1969):

$$\chi^2 = (F_{\text{applied}} - F_{\text{fitted}})^T \cdot V^{-1} \cdot (F_{\text{applied}} - F_{\text{fitted}}) \quad (5)$$

A boa qualidade no ajuste, segundo a distribuição qui-quadrado, é alcançada quando o valor dessa quantidade é próximo do número dos graus de liberdade:

$$\nu = N - m \quad (6)$$

Podemos então definir o qui-quadrado reduzido:

$$\chi_v^2 = \frac{\chi^2}{\nu} \quad (7)$$

Cujo valor desejado é aproximadamente igual a 1.

Ainda há os indicadores de desempenho a auxiliares na qualidade dos ajustes. O Desvio Padrão do Ajuste coincide com o valor do qui-quadrado reduzido para este trabalho em que a matriz de covariâncias V é uma matriz identidade. Ainda, calculamos a Tendência do Ajuste como auxiliar da análise do desempenho do ajuste, Eq. (7) para N_d sendo o número total de diferenças consideradas.

$$Td = \frac{1}{N_d} \sum_{i=1}^N (F_{i \text{ fitted}} - F_{i \text{ applied}}) \quad (8)$$

2.5. A predição dos valores de esforços aerodinâmicos:

Para prever os valores dos esforços aerodinâmicos, a partir das leituras das células de carga, utilizamos os valores estimados dos esforços, após estimativa dos valores de parâmetros, dados pela Eq.(9). Cada esforço aerodinâmico possui um conjunto de 7 parâmetros ajustados.

$$F_{fitted} = R \cdot \hat{p} \quad (9)$$

$\hat{p}$

R é 1×7 e $\hat{p}$ é 7×1 .

As covariâncias e variâncias (e incertezas) nos esforços aerodinâmicos preditos podem ser obtidas pela Eq.(10):

$$V_{F_{fitted}} = R \cdot V_{\hat{p}} \cdot R^T \quad (10)$$

Essa equação é equivalente a aplicar a lei de propagação de incertezas (LPI) na Eq.(1) (BIPM, 1995).

3. RESULTADOS

Os resultados estão mostrados no anexo de tabelas de valores numéricos. Foram efetuadas 3 calibrações repetitivas para análise de repetitividade aqui chamadas de C1, C2 e C3. Existe então um valor de resultado numérico para cada esforço aerodinâmico em cada calibração.

Nas tabelas de 1 a 3 os resultados estão classificados para cada esforço aerodinâmico, de F1 a F6 em cada calibração C1, C2 ou C3.

Na Tabela1 temos: Na horizontal: o respectivo parâmetro (coeficiente) estimado da Eq. (1). Na vertical: O resultado numérico de cada esforço aerodinâmico em cada calibração.

Poder de Predição em Condições de Repetitividade: Mantendo-se os parâmetros estimados em uma das calibrações, a Curva de Calibração foi utilizada para prever as demais duas calibrações restantes. Quando temos $C_i \times C_j$, i igual a j , trata-se do Indicador de Desempenho referente ao ajuste numérico da

Curva de Calibração. Quando não, $C_i \times C_j$, i diferente de j , então no cabeçalho horizontal temos a calibração onde extraímos os valores numéricos da Curva de Calibração e as demais são os Indicadores de Desempenho da Predição dos esforços aerodinâmicos. Como sabemos os valores medidos, é possível calcular as diferenças com relação aos valores preditos extrair os indicadores de desempenho.

Na Tabela2 e Tabela3 temos: Na horizontal e na vertical: as calibrações de ajuste e de predição, dependendo de C_i e C_j . Se i e j são iguais, então trata-se da calibração e os Indicadores de Desempenho são calculados a partir de valores estimados. Se i e j forem diferentes, trata-se da predição com os parâmetros ajustados em C_i , os Indicadores de Desempenho são calculados a partir dos valores preditos.

Existe uma Matriz de Covariância para cada ajuste de esforço aerodinâmico em cada calibração, ou seja, são dezoito Matrizes de Covariâncias. Aqui são mostradas as Matrizes com os maiores valores de variâncias e as de menores valores de variâncias.

Nas Tabelas de 5 a 10 temos: Matrizes de Covariâncias relativas aos parâmetros da Tabela1. Quando temos $a_i \times a_j$, i igual a j , trata-se da variância do parâmetro estimado. Quando não, $a_i \times a_j$, i diferente de j , trata-se da covariância aos pares.

Tabela5 - Referente aos parâmetros estimados na calibração C1 do esforço F3, esforço com o maior valor de variância.

Tabela6 - Referente aos parâmetros estimados na calibração C2 do esforço F3.

Tabela7 - Referente aos parâmetros estimados na calibração C3 do esforço F3.

Tabela8 - Referente aos parâmetros estimados na calibração C1 do esforço F2, esforço com o menor valor de variância.

Tabela9 - Referente aos parâmetros estimados na calibração C2 do esforço F2.

Tabela10 - Referente aos parâmetros estimados na calibração C3 do esforço F2.

4. DISCUSSÕES

Parâmetros: As magnitudes dos parâmetros ajustados são predominantes para a respectiva célula de carga, ou seja, há uma notável separação das variáveis na Balança

Aerodinâmica. A exceção é em F2 que possui uma dependência plausível das células R2 (a2) e R6 (a6). Quanto a repetitividade dos valores numéricos dos a_i para os F_j , i diferente de j (exceto R6 para F2), as amplitudes entre valores variaram de -0.0296 a 0.1060, dependendo de F_i ou R_i .

Matrizes de Covariâncias dos Parâmetros Ajustados: Dentro das Matrizes de Covariâncias, o maior valor de variância encontrado foi para o parâmetro a_3 (6.7735e-004) na calibração C2, correspondendo ao valor de incerteza estimada de 2.6026e-002. Para uma abrangência de probabilidade de 95,4%, a incerteza relativa no caso de a_3 é de 0,20%, revelando a alta significância do parâmetro para o esforço F3 no modelo matemático considerado.

O menor valor de variância encontrado foi para o parâmetro a_1 (6,02E-07) na calibração C2 para o esforço F2, correspondendo ao valor de incerteza estimada 7,76E-04. Para uma abrangência de probabilidade de 95,4%, a incerteza relativa no caso de a_1 é de 7,29%, revelando ainda significância do parâmetro para o esforço F2 no modelo matemático considerado.

Tendências: Os valores de Tendências do ajuste das Curvas de Calibração mostraram valor máximo em módulo de -9.3553e-016 para o esforço F1 da calibração C3, várias ordens de grandeza menor que o valor máximo em módulo das Tendências para as predições que foi de -1.4457e-002 para o esforço F3 da predição da calibração C2 pela Calibração C3.

Desvio Padrão do Ajuste e Qui Quadrado Reduzido: Os valores desses dois Indicadores são os mesmos, uma vez que escolhemos a Matriz de Covariância dos valores medidos igual a identidade e não foram efetuadas iterações repetitivas. O valor máximo para esses dois Indicadores de Performance no ajuste foi de 0.0723 (esforço F3). Como não foram consideradas incertezas nos valores medidos, então o Desvio Padrão do Ajuste serve como uma estimativa de incerteza para os esforços medidos. A maior incerteza estimada não passa de uma unidade decimal do valor medido. Quanto à repetitividade, o valor desses Indicadores de Performance encontrado foi de 0.0948 no máximo, confirmando a ordem de grandeza da incerteza máxima próximo de uma unidade decimal para os esforços medidos. Bons

valores de Qui – Quadrado reduzido seriam iguais a unidade (1), o que não foi o encontrado, mesmo sendo um resultado satisfatório para o Desvio Padrão do Ajuste. Isto decorre do fato de que as incertezas escolhidas para os esforços de entrada (e leituras da células de carga) podem não condizer com a realidade (Barker *et al*, 2004). O valor de incerteza escolhido igual a 1 é muito grande para os padrões utilizados na calibração.

5. CONCLUSÕES

Com o trabalho efetuado, encontramos estimativas numéricas dos erros sistemáticos e de incertezas para uma modelagem polinomial multivariada de primeiro grau que não cruza a origem. Para determinados ensaios de rotina, os níveis numéricos aqui expressos são satisfatórios.

Contudo, as estimativas podem ser lapidadas por trabalhos futuros envolvendo incertezas e até mesmo covariâncias dos valores medidos, tal como as incertezas oriundas das calibrações do sistema de medição.

O parâmetro a_0 (tara) possui significância no modelo matemático numa abrangência de probabilidade de 95,4%, podendo então ser atribuído um valor remanescente na leitura zero das células de carga. Contudo, como exceção, já não é verdade para abrangência de probabilidade de 99,6%, o qual, e somente porém para alguns esforços, a_0 pode ser considerado uma estimativa de zero.

AGRADECIMENTOS

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq

Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial – DCTA

Instituto de Aeronáutica e Espaço – IAE
Instituto de Fomento e Coordenação Industrial – IFI

REFERÊNCIAS

1. BIPM – Bureau Internacional de Pesos e Medidas; IEC – Comissão Internacional de Eletrotécnica; IFCC – Federação Internacional de Química Clínica e de Laboratórios de Medicina; ISO – Organização Internacional para

Normalização; IUPAC – União Internacional de Química Pura e Aplicada; IUPAP – União Internacional de Física Pura e Aplicada. “International Vocabulary of Metrology- Basic Concepts and Associated Terms – VIM”. 3a edição. BIPM - JCGM WG2. 2008.

- Barker, R.M., Cox, M.G., Forbes, A.B., Harris P. M., “Software Support for Metrology Best Practice Guide n.º 4: Discrete Modeling and Experimental Data Analysis”, Technical report, National Physical Laboratory, Teddington, UK, 2004.
- Bevington, P. R., “Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences”, McGraw-Hill, 1969.

- Calibration Report, Micro Craft Applied Science & Engineering, MC-.36-.63-A, May 1995, CA, USA.
- HELENE, O., Método dos Mínimos Quadrados com Formalismo Matricial. 1ª edição. Brasil. Livraria da Física. 2006.
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. , Flannery, B. P., “Numerical Recipes”, Cambridge University Press, 2nd ed., 1992.
- BIPM, “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements”, 1995.

ANEXO: TABELAS DE VALORES NUMÉRICOS																	
F1		F2			F3			F4			F5			F6			
C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	
2,38E-02	-2,33E-02	-1,74E-02	-1,71E-02	-5,33E-02	1,57E-01	2,56E-01	1,50E-01	6,00E-03	-3,68E-02	2,21E-02	-5,30E-03	1,11E-02	2,43E-02	6,25E-02	1,02E-01	8,40E-02	
3,53E+00	3,54E+00	2,13E-02	1,85E-02	2,07E-02	1,85E-02	1,52E-02	1,89E-02	-3,90E-03	-6,10E-03	-4,20E-03	-1,40E-02	-1,23E-02	-1,48E-02	-1,33E-02	-9,20E-03	-1,43E-02	
9,00E-03	8,20E-03	-2,30E+01	-2,30E+01	-2,30E+01	1,47E-01	1,45E-01	1,51E-01	9,81E-02	9,76E-02	9,67E-02	3,22E-01	3,16E-01	3,16E-01	2,05E-01	1,82E-01	2,01E-01	
-1,71E-02	-8,80E-03	2,00E-04	-1,00E-04	2,10E-03	-2,60E+01	-2,60E+01	-2,60E+01	2,92E-01	3,01E-01	2,90E-01	3,65E-02	2,31E-02	2,90E-02	-1,88E-02	-2,75E-02	-2,31E-02	
-3,70E-03	1,70E-03	-4,90E-03	-3,90E-03	-4,10E-03	1,39E-02	1,16E-02	1,56E-02	-5,71E+00	-5,71E+00	-5,71E+00	4,50E-03	3,31E-02	2,80E-02	5,50E-03	-3,00E-04	2,70E-03	
-1,20E-03	3,90E-03	7,90E-03	7,60E-03	6,60E-03	5,80E-03	1,10E-03	5,80E-03	4,00E-04	2,82E-02	2,01E-02	4,65E+00	4,65E+00	4,65E+00	2,30E-03	-1,80E-03	1,00E-03	
3,40E-03	3,30E-03	-3,38E+00	-3,37E+00	-3,38E+00	3,59E-02	3,41E-02	3,76E-02	-2,42E-02	-2,60E-02	-2,46E-02	1,68E-02	1,60E-02	1,42E-02	4,81E+00	4,79E+00	4,80E+00	
Tabela1 - Coeficientes para estimativa dos esforços em três calibrações																	
Tabelas numéricas para a análise do poder de predição em condições de Repetitividade																	
C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	
1,35E-02	1,48E-02	6,44E-03	9,16E-03	1,12E-02	3,60E-02	8,77E-02	3,17E-02	2,22E-02	6,88E-02	4,17E-02	3,23E-02	6,25E-02	5,05E-02	8,12E-03	2,24E-02	8,89E-03	
6,87E-03	1,55E-02	1,03E-02	5,32E-03	1,25E-02	5,14E-02	7,23E-02	5,30E-02	6,68E-02	2,42E-02	3,50E-02	6,20E-02	3,29E-02	3,25E-02	1,88E-02	1,17E-02	1,61E-02	
1,14E-02	1,10E-02	8,92E-03	9,08E-03	8,71E-03	3,72E-02	9,48E-02	3,05E-02	4,17E-02	3,71E-02	2,21E-02	5,27E-02	3,53E-02	3,01E-02	8,79E-03	1,96E-02	8,21E-03	
Tabela2 - Desvio Padrão e Qui Quadrado Reduzido do Ajuste ou da Predição																	
C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	
-8,78E-03	-2,63E-03	2,33E-16	2,31E-03	6,45E-03	6,54E-16	-1,37E-02	7,74E-04	1,96E-16	8,88E-03	-2,53E-03	2,14E-16	-4,10E-03	-4,20E-03	-5,78E-17	-1,00E-02	-2,69E-03	
a1	a2	a3	a4	a5	a6						a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6
-3,05E-05	2,19E-07	-7,64E-07	-1,23E-07	6,55E-08	2,55E-07						5,82E-05	-3,09E-06	6,34E-09	-7,88E-08	-2,22E-09	-4,02E-09	1,83E-08
5,95E-06	-9,51E-08	-1,22E-07	2,32E-08	-5,34E-08	-5,11E-08					a0	-3,09E-06	6,02E-07	-1,06E-08	-1,28E-08	1,83E-09	-5,37E-09	-5,20E-09
-9,51E-08	1,15E-04	-8,32E-07	-4,50E-07	1,24E-06	1,74E-05					a1	6,34E-09	-1,06E-08	1,17E-05	-8,05E-08	-4,66E-08	1,28E-07	1,77E-06
-1,22E-07	-8,32E-07	1,46E-04	-1,53E-06	8,93E-08	-2,86E-07					a2	-7,88E-08	-1,28E-08	-8,05E-08	1,49E-05	-1,55E-07	1,17E-08	-2,66E-08
2,32E-08	-4,50E-07	-1,53E-06	2,83E-05	1,33E-08	1,33E-07					a3	-2,22E-09	1,83E-09	-4,66E-08	-1,55E-07	2,87E-06	1,63E-09	1,42E-08
-5,34E-08	1,24E-06	8,93E-08	1,33E-08	1,88E-05	5,50E-08					a4	-4,02E-09	-5,37E-09	1,28E-07	1,17E-08	1,63E-09	1,91E-06	7,00E-09
-5,11E-08	1,74E-05	-2,86E-07	1,33E-07	5,50E-08	1,64E-05					a5	1,83E-08	-5,20E-09	1,77E-06	-2,66E-08	1,42E-08	7,00E-09	1,66E-06
Matriz de Incertezas e Covariâncias nos Parâmetros para calibração C3, esforço F3						Tabelas - Matriz de Incertezas e Covariâncias nos Parâmetros para calibração C1, esforço F2											
a1	a2	a3	a4	a5	a6									7,76E-04	7,29E+00		
-2,53E-06	2,26E-09	-1,09E-07	1,79E-08	4,48E-09	2,33E-08					a0	6,03E-05	-3,20E-06	2,30E-08	-8,03E-08	-1,30E-08	6,88E-09	2,68E-08
4,95E-07	-6,80E-09	-9,67E-09	1,96E-09	-4,31E-09	-2,86E-09					a1	-3,20E-06	6,25E-07	-9,99E-09	-1,28E-08	2,43E-09	-5,62E-09	-5,37E-09
-6,80E-09	9,58E-06	-6,55E-08	-3,79E-08	1,03E-07	1,45E-06					a2	2,30E-08	-9,99E-09	1,21E-05	-8,74E-08	-4,73E-08	1,31E-07	1,83E-06
-9,67E-09	-6,55E-08	1,22E-05	-1,30E-07	7,89E-09	-2,32E-08					a3	-8,03E-08	-1,28E-08	-8,74E-08	1,54E-05	-1,60E-07	9,38E-09	-3,00E-08
1,96E-09	-3,79E-08	-1,30E-07	2,36E-06	-4,99E-10	1,09E-08					a4	-1,30E-08	2,43E-09	-4,73E-08	-1,60E-07	2,97E-06	1,40E-09	1,40E-08
-4,31E-09	1,03E-07	7,89E-09	-4,99E-10	1,56E-06	4,45E-09					a5	6,88E-09	-5,62E-09	1,31E-07	9,38E-09	1,40E-09	1,97E-06	5,78E-09
-2,86E-09	1,45E-06	-2,32E-08	1,09E-08	4,45E-09	1,36E-06					a6	2,68E-08	-5,37E-09	1,83E-06	-3,00E-08	1,40E-08	5,78E-09	1,72E-06
Matriz de Incertezas e Covariâncias nos Parâmetros para calibração C2, esforço F2						Tabela10 - Matriz de Incertezas e Covariâncias nos Parâmetros para calibração C3, esforço F2											
a1	a2	a3	a4	a5	a6												
-2,53E-06	2,26E-09	-1,09E-07	1,79E-08	4,48E-09	2,33E-08					a0	6,03E-05	-3,20E-06	2,30E-08	-8,03E-08	-1,30E-08	6,88E-09	2,68E-08
4,95E-07	-6,80E-09	-9,67E-09	1,96E-09	-4,31E-09	-2,86E-09					a1	-3,20E-06	6,25E-07	-9,99E-09	-1,28E-08	2,43E-09	-5,62E-09	-5,37E-09
-6,80E-09	9,58E-06	-6,55E-08	-3,79E-08	1,03E-07	1,45E-06					a2	2,30E-08	-9,99E-09	1,21E-05	-8,74E-08	-4,73E-08	1,31E-07	1,83E-06
-9,67E-09	-6,55E-08	1,22E-05	-1,30E-07	7,89E-09	-2,32E-08					a3	-8,03E-08	-1,28E-08	-8,74E-08	1,54E-05	-1,60E-07	9,38E-09	-3,00E-08
1,96E-09	-3,79E-08	-1,30E-07	2,36E-06	-4,99E-10	1,09E-08					a4	-1,30E-08	2,43E-09	-4,73E-08	-1,60E-07	2,97E-06	1,40E-09	1,40E-08
-4,31E-09	1,03E-07	7,89E-09	-4,99E-10	1,56E-06	4,45E-09					a5	6,88E-09	-5,62E-09	1,31E-07	9,38E-09	1,40E-09	1,97E-06	5,78E-09
-2,86E-09	1,45E-06	-2,32E-08	1,09E-08	4,45E-09	1,36E-06					a6	2,68E-08	-5,37E-09	1,83E-06	-3,00E-08	1,40E-08	5,78E-09	1,72E-06

a1	a2	a3	a4	a5	a6						a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6
-3,05E-05	2,19E-07	-7,64E-07	-1,23E-07	6,55E-08	2,55E-07						5,82E-05	-3,09E-06	6,34E-09	-7,88E-08	-2,22E-09	-4,02E-09	1,83E-08
5,95E-06	-9,51E-08	-1,22E-07	2,32E-08	-5,34E-08	-5,11E-08						-3,09E-06	6,02E-07	-1,06E-08	-1,28E-08	1,83E-09	-5,37E-09	-5,20E-09
-9,51E-08	1,15E-04	-8,32E-07	-4,50E-07	1,24E-06	1,74E-05						6,34E-09	-1,06E-08	1,17E-05	-8,05E-08	-4,66E-08	1,28E-07	1,77E-06
-1,22E-07	-8,32E-07	1,46E-04	-1,53E-06	8,93E-08	-2,86E-07						-7,88E-08	-1,28E-08	-8,05E-08	1,49E-05	-1,55E-07	1,17E-08	-2,66E-08
2,32E-08	-4,50E-07	-1,53E-06	2,83E-05	1,33E-08	1,33E-07						-2,22E-09	1,83E-09	-4,66E-08	-1,55E-07	2,87E-06	1,63E-09	1,42E-08
-5,34E-08	1,24E-06	8,93E-08	1,33E-08	1,88E-05	5,50E-08						-4,02E-09	-5,37E-09	1,28E-07	1,17E-08	1,63E-09	1,91E-06	7,00E-09
-5,11E-08	1,74E-05	-2,86E-07	1,33E-07	5,50E-08	1,64E-05						1,83E-08	-5,20E-09	1,77E-06	-2,66E-08	1,42E-08	7,00E-09	1,66E-06
Matriz de Incertezas e Covariâncias nos Parâmetros para calibração C3, esforço F3											Tabela8 - Matriz de Incertezas e Covariâncias nos Parâmetros para calibração C1, esforço F2						
														7,76E-04		7,29E+00	
a1	a2	a3	a4	a5	a6						a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6
-2,53E-06	2,26E-09	-1,09E-07	1,79E-08	4,48E-09	2,33E-08						6,03E-05	-3,20E-06	2,30E-08	-8,03E-08	-1,30E-08	6,88E-09	2,68E-08
4,95E-07	-6,80E-09	-9,67E-09	1,96E-09	-4,31E-09	-2,86E-09						-3,20E-06	6,25E-07	-9,99E-09	-1,28E-08	2,43E-09	-5,62E-09	-5,37E-09
-6,80E-09	9,58E-06	-6,55E-08	-3,79E-08	1,03E-07	1,45E-06						2,30E-08	-9,99E-09	1,21E-05	-8,74E-08	-4,73E-08	1,31E-07	1,83E-06
-9,67E-09	-6,55E-08	1,22E-05	-1,30E-07	7,89E-09	-2,32E-08						-8,03E-08	-1,28E-08	-8,74E-08	1,54E-05	-1,60E-07	9,38E-09	-3,00E-08
1,96E-09	-3,79E-08	-1,30E-07	2,36E-06	-4,99E-10	1,09E-08						-1,30E-08	2,43E-09	-4,73E-08	-1,60E-07	2,97E-06	1,40E-09	1,40E-08
-4,31E-09	1,03E-07	7,89E-09	-4,99E-10	1,56E-06	4,45E-09						6,88E-09	-5,62E-09	1,31E-07	9,38E-09	1,40E-09	1,97E-06	5,78E-09
-2,86E-09	1,45E-06	-2,32E-08	1,09E-08	4,45E-09	1,36E-06						2,68E-08	-5,37E-09	1,83E-06	-3,00E-08	1,40E-08	5,78E-09	1,72E-06
Matriz de Incertezas e Covariâncias nos Parâmetros para calibração C2, esforço F2											Tabela10 - Matriz de Incertezas e Covariâncias nos Parâmetros para calibração C3, esforço F2						