

Avaliação da Incerteza de Medição Associada à Tensão Mecânica na Amostra em Equipamento de Carregamento Progressivo

Guilherme Antonelli Martiniano*, José Eduardo Silveira Leal, Sinésio Domingues Franco, Rosenda Valdés Arencibia.

*Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste, gamartiniano@gmail.com

Palavras-chave

Rising step-load, Método de Monte Carlo, GUM

1. INTRODUÇÃO

Raymond (1995) desenvolveu um equipamento capaz de avaliar a susceptibilidade à fragilização por hidrogênio de aços em até 60 horas, realizando um ensaio de carregamento progressivo em meio assistido, em inglês, *rising step-load* (RSL) com a mesma precisão, ou até melhor, do que os métodos convencionais.

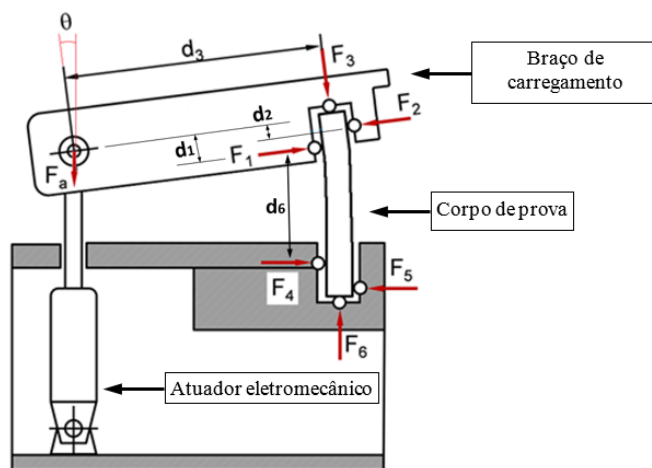


Figura 1: croqui do equipamento mencionado

Equipamento semelhante ao da Fig. 1 foi desenvolvido por Martiniano (2016). Para a validação do equipamento, as incertezas associadas ao cálculo da tensão mecânica na amostra devem ser avaliadas. O presente trabalho descreve a metodologia utilizada para a avaliação da incerteza de medição utilizando os métodos GUM (JCGM, 2008a) e Monte Carlo (JCGM et al., 2008b).

O método de avaliação da incerteza de medição proposto pelo GUM apresenta limitações de aplicabilidade, tais como: é mais específico para modelos explícitos com apenas uma variável de saída; requer que o modelo matemático que descreve o processo de medição seja linear; a variável de saída deve ter uma distribuição normal; e exige a determinação dos graus de liberdade da incerteza combinada. Pode-se destacar, ainda que as derivadas parciais, que representam os coeficientes de sensibilidade devem ser calculadas e em algumas aplicações estas derivadas podem ser complexas e de difícil resolução, constituindo uma fonte significativa de erros e uma barreira difícil de ser superada por muitos usuários.

O GUM S1 baseia-se na simulação de Monte Carlo (MC) e está livre da maioria das limitações do GUM, além disso, não contradiz as recomendações nele apresentadas. Quando aplicado para avaliação da incerteza de medição, este método permite combinar distribuições de probabilidades, significando muito mais do que simplesmente propagar incertezas estatísticas. Ainda por ser fundamentado na geração de números aleatórios para simular os valores de variáveis aleatórias, o método de MC pode ser considerado melhor do que o GUM que realiza cálculos analíticos (INMETRO, 2008).

2. METODOLOGIA

Durante os ensaios no RSL, a tensão mecânica na amostra no ponto de força máxima de $F_a = 9498,628 \text{ N}$ é determinada utilizando a Eq. 1:

$$\sigma = F_a \left[\frac{3}{bh^2} (2d_1 \sin \theta + 2d_3 \cos \theta + d_6 \sin \theta) - \frac{\cos \theta}{bh} \right] \quad (1)$$

Na Eq. 1, F_a é a força realizada pelo atuador; d_1 e d_2 são as distâncias verticais das forças F_1 e F_2 em relação ao eixo de giro do braço de flexão; d_3 é a distância horizontal do eixo de giro do braço de flexão em relação ao eixo central do corpo de prova; d_6 é a distância vertical entre os centros dos roletes do braço de carregamento e do suporte inferior que apoiam a face oposta ao entalhe da amostra; b e h representam a largura e a profundidade da seção transversal do corpo de prova; e θ é o ângulo de giro do braço atuador.

Essas variáveis foram medidas utilizando diferentes sistemas de medição, a saber: célula de carga para medir a força F_a ; encoder rotativo para medir o ângulo θ ; máquina de medir por coordenadas (MMC) para medir as distâncias d_1 , e d_3 ; paquímetro digital para medir as cotas b e h ; e régua para medir a cota d_6 .

Desta forma a incerteza associada à medição de cada mensurando devem ser quantificadas, de tal forma que se possa determinar o erro associado ao cálculo da tensão mecânica na amostra. Todas as incertezas-padrão (u) associadas às variáveis de entrada, e seus respectivos graus de liberdade efetivos, foram previamente calculados conforme recomenda o GUM. Foram utilizadas as planilhas desenvolvidas por Moraes (2011). Os valores obtidos são mostrados da Tab. 1.

Tabela 1: Variáveis de entrada e suas respectivas incertezas padrão.

Variável de Entrada	Estimativa	Tipo de Avaliação	Graus de liberdade	Incerteza-padrão
F_a	9498,628 N	A	∞	0,011N
d_1	12,102 mm	A	14,52	0,009 mm
d_3	400,026 mm	A	14,52	0,004 mm
d_6	113,5 mm	A	22,95	0,5 mm
h	29,91 mm	A	430,56	0,03 mm
b	29,92 mm	A	548,90	0,03 mm
θ	93° 18'	A	∞	0° 13'

2.1. Propagação de incertezas via GUM

A incerteza-padrão combinada relacionada à tensão mecânica foi determinada analiticamente aplicando a lei de propagação de incertezas (LPI) na Eq. 1. Desta forma foi obtida a Eq. 2.

$$u_c^2(\sigma) = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial F_a} \right)^2 u^2(F_a) + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial d_1} \right)^2 u^2(d_1) + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial d_3} \right)^2 u^2(d_3) + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial d_6} \right)^2 u^2(d_6) + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial b} \right)^2 u^2(b) + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial h} \right)^2 u^2(h) + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \theta} \right)^2 u^2(\theta) \quad (2)$$

Para estimar a incerteza de medição é preciso resolver as derivadas da Eq. 2, como mostram as Eqs. 5-11.

$$\frac{\partial \sigma}{\partial F_a} = \frac{3}{bh^2} (2d_1 \sin \theta + 2d_3 \cos \theta + d_6 \sin \theta) - \frac{\cos \theta}{bh} = 0,089 \text{ mm}^{-2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial d_1} = \frac{6F_a \sin \theta}{bh^2} = 0,120 \text{ Nmm}^{-3} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial d_3} = \frac{6F_a \cos \theta}{bh^2} = 2,126 \text{ Nmm}^{-3} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial d_6} = \frac{3F_a \sin \theta}{bh^2} = 0,060 \text{ Nmm}^{-3} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial b} = -F_a \left(\frac{6d_1 \sin \theta + 6d_3 \cos \theta + 3d_6 \sin \theta}{b^2 h^2} - \frac{\cos \theta}{b^2 h} \right) = -0,073 \text{ Nmm}^{-3} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial h} = -F_a \left(\frac{12d_1 \sin \theta + 12d_3 \cos \theta + 6d_6 \sin \theta}{bh^3} - \frac{\cos \theta}{bh^2} \right) = -57,163 \text{ Nmm}^{-3} \quad (10)$$

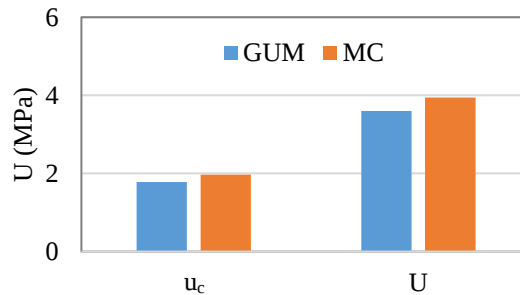
$$\frac{\partial \sigma}{\partial \theta} = F_a \left(\frac{6d_1 \cos \theta - 6d_3 \sin \theta + 3d_6 \cos \theta}{bh^2} + \frac{\sin \theta}{bh} \right) = 125,497 \text{ Nmm}^{-2} \quad (11)$$

2.2. Propagação de incertezas via MC

A incerteza-padrão combinada relacionada à tensão mecânica foi determinada, também, numericamente aplicando a simulação de Monte Carlo. Para tanto, foi utilizado o *software* Microsoft Excel 2013® para gerar e propagar as incertezas no modelo matemático da medição, Eq. 1. Foram realizadas 1 000 000 de iterações.

3. RESULTADOS

Os valores de incerteza-padrão combinada e incerteza expandida (95%) associados à tensão mecânica são mostrados na Fig. 2.



A $u_c(\sigma)$ avaliada pelo método MC é de 1,97 MPa e para o método GUM é de 1,78 MPa. No método GUM as variáveis com maior contribuição na incerteza-padrão combinada foram: d_6 , θ e h com, respectivamente, 0,03 %, 7,11 % e 92,86 % de contribuição.

4. CONCLUSÕES

Observa-se que a diferença entre os valores de incerteza expandida obtidos pelos métodos Monte Carlo e GUM é de 0,19 MPa, sendo de apenas 0,02 % da tensão aplicada da amostra (849,58 MPa) e, consequentemente, ambos podem ser empregues para a avaliação de $u_c(\sigma)$. No entanto, a maior praticidade da simulação de Monte Carlo e a ausência da necessidade de aplicar a LPI faz com que este apresente uma grande vantagem em relação ao método descrito no GUM.

É atribuída maior credibilidade aos resultados obtidos aplicando o método de MC, pois, devido à complexidade do modelo matemático da medição resultados inverossímeis poderiam ser obtidos aplicando o GUM.

A avaliação da incerteza utilizando o GUM possibilitou a identificação das contribuições individuais das variáveis de entrada o que norteia o aprimoramento do equipamento em questão. A redução da incerteza associada a medição de σ pode ser obtida com o aumento da qualidade da medição de h . Para tanto, pode-se utilizar outros sistemas de medição como, por exemplo, micrômetros e máquinas de medir por coordenadas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às instituições CNPq, CAPES-PROEX e à FAPEMIG.

6. REFERÊNCIAS

- INMETRO. “Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008”. Rio de Janeiro, RJ, 2012.
- JCGM. “Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement”. *JCGM 100*, 2008a
- JCGM. “Evaluation of Measurement Data — Supplement 1 to the “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement” — Propagation of Distributions Using a Monte Carlo Method”. *JCGM 101*, 2008b.
- Martiniano, G.A. “Desenvolvimento de um Equipamento para Avaliação da Susceptibilidade à Fragilização por Hidrogênio”. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2016.
- Moraes, M.A.F. “Desenvolvimento de Planilhas Eletrônicas para Calcular Incerteza de Medição”. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, 2011.
- Raymond, L.” Rising Step-Load Test Apparatus”. *US n. 5.505.095*, 7 jun. 1995, 9 abr. 1996.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.