INCERTEZA DE MEDIÇÃO DO ENSAIO DE TENACIDADE À FRATURA K_{IC}

MEASUREMENT UNCERTAINTY OF FRACTURE TOUGHNESS K_{IC} TEST

FABRICIO, Daniel Antonio Kapper^{1*}; TREVISAN, Lisiane²; STROHAECKER, Telmo Roberto³;

^{1,3} Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Laboratório de Metalurgia Física.
Av. Osvaldo Aranha, 99/610, CEP 90035-190, Porto Alegre – RS, Brasil
(fone: +55 51 3308 4251; fax: +55 51 3308 3988)

² Instituto Federal do Rio Grande do Sul, Campus Farroupilha, Av. São Vicente, 785, CEP 95180-000 -
Farroupilha, RS - Brasil
(fone: +55 54 3035 1432)

** Autor correspondente*
e-mail: daniel.fabricio@ufrgs.br

Received 30 October 2015; received in revised form 07 December 2015; accepted 14 December 2015

RESUMO

O monitoramento da qualidade de processos produtivos, desde o material bruto até o produto acabado, permite a tomada de decisão e a garantia da qualidade do produto final. O valor de K_{IC} é uma propriedade dos materiais metálicos que possuem comportamento frágil em relação à fratura em condições linear-elásticas, apresentando limitada quantidade de deformação plástica na ponta da trinca. Na área de ensaios mecânicos, é importante obter as propriedades de tenacidade à fratura, incluindo o parâmetro K_{IC} , visto que o setor de óleo e gás exige materiais de alto desempenho mesmo em condições severas. O Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM) representa uma metodologia para a estimativa da incerteza de medição de ensaios quantitativos, baseada na lei de propagação de incertezas. Esse trabalho apresenta o desdobramento e a aplicação das etapas do GUM na estimativa da incerteza de medição do ensaio de K_{IC} . Os resultados foram analisados, visando verificar quais fontes mais contribuíram para a incerteza combinada, concluindo-se que a maior contribuição para a incerteza foi a variabilidade entre corpos de prova. Espera-se, com esse trabalho, incentivar outros laboratórios a implementar o GUM em ensaios de tenacidade à fratura, e preencher uma lacuna da literatura nesse campo.

Palavras-chave: Incerteza de medição, GUM, Tenacidade à fratura, K_{IC} .

ABSTRACT

Quality monitoring of production processes, from raw material to final product, enables decision-making and quality assurance of the product. The K_{IC} value is a property of brittle metallic materials, which present limited amount of plastic deformation at the crack tip under linear-elastic conditions. In the field of mechanical testing, it is important to obtain fracture toughness properties, including K_{IC} parameter, because the oil and gas industry requires high performance materials even in severe conditions. The Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) represents a methodology for the estimation of measurement uncertainty in quantitative tests, and is based on the law of propagation of uncertainties. This work presents the deployment and application of GUM steps in the estimation of the K_{IC} measurement uncertainty. The results were analyzed in order to check which sources contributed most to the combined uncertainty, concluding that the largest contribution was due to the variability between specimens. We expect, with this work, to encourage other laboratories to implement GUM for fracture toughness tests, and also to fill a literature gap in this field.

Keywords: Measurement uncertainty, GUM, Fracture toughness, K_{IC} .

INTRODUÇÃO

O controle de qualidade dos processos produtivos, desde o material bruto até o produto acabado, é crítico no monitoramento de defeitos e permite a tomada de decisão e a garantia da qualidade do produto final. Esse controle pode ser realizado em laboratórios ou em medições *online*, através de equipamentos e instrumentos adequados. Ao se relatar o resultado de medição de uma grandeza física, é necessário fornecer alguma informação quantitativa da qualidade do resultado fornecido, visando avaliar a sua confiabilidade. O objetivo de se estimar a incerteza de medição é quantificar o quão correto o resultado é, ou seja, a dúvida sobre o quão preciso é o valor medido (JCGM, 2008a).

Diversos fatores justificam o cálculo da incerteza de medição na área de ensaios e calibração. Através do valor de incerteza é possível verificar a confiabilidade dos resultados obtidos, permitindo a aprovação de tais resultados dentro dos limites de tolerância estabelecidos pelo cliente.

De acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM), a incerteza de medição pode ser definida como um parâmetro não-negativo que caracteriza a dispersão dos valores quantitativos atribuídos a um mensurando, com base na informação utilizada (JCGM, 2008b).

A correta expressão da incerteza de medição por laboratórios de ensaio pode ser considerada um fator chave, pois afeta diretamente na interpretação dos resultados (JORNADA, 2009). O Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM) (JCGM, 2008a) apresenta uma metodologia amplamente utilizada e reconhecida internacionalmente para a estimativa de incerteza. Hack e Caten (2012) realizaram uma revisão da literatura em mais de cem publicações sobre incerteza de medição publicadas entre 2004 e 2010, e 55% delas utilizaram o método previsto no GUM.

Na área de ensaios mecânicos, é importante obter as propriedades de tenacidade à fratura porque o setor de óleo e gás exige materiais de alto desempenho nas mais severas condições. A tenacidade à fratura K_{IC} do material é definida como a habilidade de um material em resistir a um carregamento na presença de uma trinca antes de falhar. Portanto, para tais

aplicações, é indispensável o conhecimento do valor de K_{IC} de materiais metálicos (FABRICIO *et al.*, 2013).

A Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) é aplicável a materiais que apresentam comportamento frágil à fratura em condições linear-elásticas, com deformação plástica limitada na ponta da trinca. O parâmetro mais usual na MFLE para avaliação da tenacidade à fratura de materiais metálicos é o valor crítico do fator intensidade de tensões no modo I (trativo) de carregamento. Esse valor é denominado K_{IC} e é uma propriedade do material, que relaciona a tensão aplicada com o tipo e o tamanho do defeito (trinca) (STROHAECKER, 2012).

O ensaio de tenacidade à fratura K_{IC} permite obter uma propriedade que descreve o comportamento de materiais linear-elásticos diante de defeitos tipo trinca, e pode ser utilizado na seleção de materiais, em projetos e em análise de falhas de estruturas de alta responsabilidade. A norma ISO 12135 (2008) apresenta um método de ensaio para o cálculo do fator intensidade de tensões K_Q , o qual pode ser validado como crítico (K_{IC}) se determinadas condições forem atendidas. O modelo de medição de K_Q para um corpo de prova de três pontos (SE(B)) é apresentada na Equação 1 (ISO, 2008).

$$K_Q = \frac{S}{W} \frac{F_Q}{(B B_N W)^{0.5}} g_1 \left(\frac{a_0}{W} \right) \quad (\text{Eq. 1})$$

Na Equação 1, S representa a abertura entre os pontos de carregamento externos no corpo de prova de três pontos, F_Q representa a carga aplicada, B a espessura do corpo de prova, B_N a espessura entre as ranhuras laterais, a_0 o tamanho inicial da trinca e g_1 é uma função adimensional de a_0/W , onde W representa a largura do corpo de prova.

O fator intensidade de tensões K_Q pode ser qualificado como crítico (K_{IC}) se o ensaio for executado de acordo com a norma ISO 12135 (2008), incluindo:

$$a_0 \geq 2,5 \left(\frac{K_Q}{R_{p0.2}} \right)^2 \quad (\text{Eq. 2})$$

$$B \geq 2,5 \left(\frac{K_Q}{R_{p0.2}} \right)^2 \quad (\text{Eq. 3})$$

$$(w - a_0) \geq 2.5 \left(\frac{K_Q}{R_{p0.2}} \right)^2 \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde $R_{p0.2}$ representa o limite de escoamento deslocado a 0,2% perpendicular ao plano da trinca na temperatura de ensaio.

Na literatura são encontrados poucos trabalhos sobre a aplicação do GUM em ensaios de tenacidade à fratura, e alguns artigos que abordam o cálculo de incerteza em outros tipos de ensaios. Chowdhury *et al.* (2014) avaliaram a incerteza na determinação da geometria de trincas em análise estrutural. Uma análise da sensibilidade do fator intensidade de tensões foi executada através de técnicas probabilísticas. Exemplos numéricos evidenciam a acurácia e a simplicidade do método, baseado no método de Monte Carlo. Bouhouche *et al.* (2015) avaliaram a incerteza de medição de propriedades mecânicas no ensaio de tração (tensão e alongamento) seguindo os métodos GUM, de Monte Carlo e de Monte Carlo por Cadeias de Markov. Os dados de entrada foram obtidos do certificado de calibração dos instrumentos de medidas. Os valores de incerteza resultaram como aproximadamente 1% dos valores medidos de tensão e alongamento. Por fim, Bono *et al.* (2010) desenvolveram um método para o cálculo de incerteza na configuração de parâmetros de corte de um torno de alta precisão. A incerteza prevista para a ferramenta foi similar aos valores determinados experimentalmente.

Considerando que há pouca literatura sobre a implementação do GUM em ensaios de tenacidade à fratura, o principal objetivo deste trabalho é apresentar as etapas de estimativa da incerteza de medição de K_Q (ou K_{IC}). Dessa forma, espera-se obter uma planilha eletrônica que possa ser utilizada na rotina de laboratórios de ensaio que executam esse ensaio, e avaliar quais fontes mais influenciam na incerteza de medição desse ensaio.

MATERIAL E MÉTODOS

A norma ISO 12135, de ensaios de tenacidade à fratura, indica algumas geometrias possíveis para o ensaio. Esse trabalho se foca no corpo de prova de três pontos (SEB), representado na Figura 1. O modelo de medição do parâmetro K_Q para esse tipo de corpo de

prova é mostrado na Equação 1.

Figura 1. Corpo de prova de três pontos K_{IC}

Nesse trabalho, os passos do GUM (JCGM, 2008a) foram seguidos visando estruturar um procedimento e planilha para expressão da incerteza de medição do ensaio de K_{IC} .

A seguir, a planilha foi aplicada no ensaio de quatro corpos de prova de aço martensítico AISI 420 obtido de material base. As propriedades mecânicas do material são: tensão de escoamento de 680 MPa, resistência à tração de 800 MPa, coeficiente de Poisson igual a 0,3 e módulo de elasticidade de 210000 MPa. A norma ISO 12135 (2008) foi utilizada na execução dos ensaios, com uma taxa de carregamento de 1 mm/min.

A medida das dimensões dos corpos de prova (Figura 1) foi realizada através de paquímetro digital. Os ensaios mecânicos foram executados em uma máquina de ensaios servo-hidráulica com capacidade de carga de 100 kN. A montagem nas máquinas de ensaio foi conforme a Figura 2.

Figura 2. Montagem do ensaio

Os parâmetros de pré-trincamento foram os seguintes: valor máximo de K durante o pré-

trincamento de 16 MPa.m^{1/2}, frequência de 20 Hz, e a_0/W final igual a 0,5. A execução do ensaio é apresentada na Figura 3.

Figura 3. Execução do ensaio

Por fim, foi realizada uma análise de quais fontes de incerteza mais contribuíram para a incerteza expandida dos resultados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como resultado, é apresentada a estruturação dos cálculos de incerteza de medição de K_Q de acordo com os passos do GUM. Então, o procedimento estruturado é aplicado na estimativa da incerteza de medição da média de K_Q de quatro corpos de prova.

Modelo de medição

O modelo de medição de K_Q para corpos de prova tipo SEB é apresentado na Equação 1. As fontes de incerteza consideradas são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Fontes de incerteza

Variável	Fonte de incerteza
F_Q	Dados do certificado de calibração da célula de carga Resolução da célula de carga
S	Dados do certificado de calibração do paquímetro Resolução do paquímetro
B	Dados do certificado de calibração do paquímetro Resolução do paquímetro
B_N	Dados do certificado de calibração do paquímetro Resolução do paquímetro
W	Dados do certificado de calibração do paquímetro Resolução do paquímetro
$g_1(a_0/W)$	Nenhuma (constante)
K_Q	Desvio padrão de n corpos de prova

Estimativa das incertezas padrão

Para cada fonte de incerteza, é necessário obter um divisor e os graus de liberdade de acordo com a sua distribuição de probabilidade. A Tabela 2 apresenta o divisor e os graus de liberdade (*GDL*) de cada fonte de incerteza. A incerteza padrão é obtida dividindo-se cada fonte pelo seu respectivo divisor (*D*).

Tabela 2. Estimativa da incerteza padrão

Variável	Fonte	<i>D</i>	<i>GDL</i>	Incerteza padrão
F_Q	Calibração	K^*	v_{eff}^*	u^*/k
	Resolução	$\sqrt{3}$	∞	$r/\sqrt{3}$
S	Calibração	K^*	v_{eff}^*	u^*/k
	Resolução	$\sqrt{3}$	∞	$r/\sqrt{3}$
B	Calibração	K^*	v_{eff}^*	u^*/k
	Resolução	$\sqrt{3}$	∞	$r/\sqrt{3}$
B_N	Calibração	K^*	v_{eff}^*	u^*/k
	Resolução	$\sqrt{3}$	∞	$r/\sqrt{3}$
W	Calibração	K^*	v_{eff}^*	u^*/k
	Resolução	$\sqrt{3}$	∞	$r/\sqrt{3}$
K_Q	Desvio	$\sqrt{n}$	$n-1$	$d/\sqrt{n}$

* Dados obtidos do certificado de calibração dos equipamentos

Determinação da incerteza combinada

Considerando as variáveis de entrada como independentes, a incerteza combinada $u_c(y)$ é estimada de acordo com a Equação 5.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)} \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde $\partial f / \partial x_i$ representa as derivadas parciais em relação ao modelo de medição para cada variável de entrada ($u(x_i)$), e são frequentemente chamados de coeficientes de sensibilidade. Os coeficientes de sensibilidade do ensaio de K_{IC} são calculados de acordo com as Equações 6 a 11.

$$c_{F_Q} = \frac{\partial K_Q}{\partial F_Q} = \frac{\partial}{\partial F_Q} \left[\frac{S}{W(BB_N W)^{0.5}} g_1 \left(\frac{a_0}{w} \right) \right] = \frac{S}{W(BB_N W)^{0.5}} g_1 \left(\frac{a_0}{w} \right) \quad (\text{Eq. 6})$$

$$c_s = \frac{\partial K_Q}{\partial S} = \frac{\partial}{\partial S} \left[\frac{S}{W(BB_N W)^{0.5}} g_1 \left(\frac{a_0}{w} \right) \right] = \frac{F_Q}{W(BB_N W)^{0.5}} g_1 \left(\frac{a_0}{w} \right) \quad (\text{Eq. 7})$$

$$c_B = \frac{\partial K_Q}{\partial B} = \frac{\partial}{\partial B} \left[\frac{S}{W(BB_N W)^{0.5}} g_1 \left(\frac{a_0}{w} \right) \right] = \frac{-SF_Q}{2B_N^{0.5}(BW)^{1.5}} g_1 \left(\frac{a_0}{w} \right) \quad (\text{Eq. 8})$$

$$c_{B_N} = \frac{\partial K_Q}{\partial B_N} = \frac{\partial}{\partial B_N} \left[\frac{S}{W(BB_N W)^{0.5}} g_1 \left(\frac{a_0}{w} \right) \right] = \frac{-SF_Q}{2B_N^{0.5}(B_N W)^{1.5}} g_1 \left(\frac{a_0}{w} \right) \quad (\text{Eq. 9})$$

$$c_W = \frac{\partial K_Q}{\partial W} = \frac{\partial}{\partial W} \left[\frac{S}{W(BB_N W)^{0.5}} g_1 \left(\frac{a_0}{w} \right) \right] = \frac{-3SF_Q}{2(BB_N)^{0.5}W^{2.5}} g_1 \left(\frac{a_0}{w} \right) \quad (\text{Eq. 10})$$

$$c_{K_Q} = \frac{\partial K_Q}{\partial K_Q} = 1 \quad (\text{Eq. 11})$$

Determinação da incerteza expandida

A incerteza expandida U é obtida pela multiplicação da incerteza padrão combinada $u_c(y)$ por um fator de abrangência K :

$$U = K u_c(y) \quad (\text{Eq. 12})$$

O fator de abrangência é calculado através dos graus de liberdade efetivos de todas as variáveis de entrada, considerando uma probabilidade de abrangência especificada de acordo com uma distribuição de probabilidade t-Student. Os graus de liberdade efetivos (v_{eff}) são calculados de acordo com a fórmula de Welch-Satterwaite (Equação 13), considerando os graus de liberdade de cada variável de entrada (v_i), que

constam na Tabela 2.

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{(u_i)^4}{v_i}} \quad (\text{Eq. 13})$$

O resultado deve ser relatado com $Y = y \pm U$, e devem ser fornecidas as unidades de y e U , onde y representa o valor medido e U representa a incerteza expandida. O GUM recomenda relatar os resultados do ensaio e a incerteza com até dois algarismos significativos, e fornecer o valor de K .

Implementação do procedimento

Quatro corpos de prova de K_{IC} (Figura 1) foram ensaiados. Os resultados dos ensaios são apresentados na Tabela 3.

A incerteza de medição foi estimada para o valor médio de K_Q de acordo com as etapas anteriores, e o resultado final foi: $K_Q = K_{IC} = 969,72 \pm 69,49$ N/mm^{3/2}, com $v_{eff} = 3,06$, $K = 3,31$ a uma probabilidade de abrangência de 95,45%. Por fim, a relação U/K_{IC} foi equivalente a $69,49/969,72 = 7,19\%$, o que pode ser considerado satisfatório. Esse valor está dentro do critério de aceitação definido pelo Guia de Análise de Sistemas de Medição (MSA), que define que a variância de um sistema é aceitável se a relação entre a variância total do sistema e o limite de tolerância da sua aplicação é menor que 10% (AIAG, 2010).

É importante descrever as contribuições de incerteza de cada fonte de incerteza para a incerteza combinada de K_Q . A Figura 4 apresenta a contribuição de incerteza (incerteza padrão multiplicada pelo coeficiente de sensibilidade) de cada variável de entrada.

De acordo com a Figura 4, a principal fonte de incerteza é o desvio padrão de repetitividade entre os corpos de prova. Uma possível causa para a incerteza padrão combinada é a variação natural entre os corpos de prova. A segunda principal contribuição foi devido à calibração do equipamento, que é uma característica do equipamento utilizado. Outras fontes de incerteza foram pouco significativas em comparação com essas.

Devido à pouca literatura nesse campo, esse trabalho apresentou um método simples de implementação do GUM, que se baseia na Lei de Propagação de Incertezas, para a estimativa da

incerteza de medição do ensaio de K_{IC} . No entanto, outras fontes de incerteza poderiam ser consideradas podem ser consideradas e analisadas em trabalhos futuros.

A maior fonte de incerteza foi o desvio padrão entre corpos de prova. Isso pode ter ocorrido devido a diferenças entre os corpos de prova, mas outra possível razão para isso é o número limitado de corpos de prova (quatro). Com um número maior de amostras, a contribuição de incerteza do desvio padrão para a incerteza combinada tende a ser menor.

Enfim, o presente trabalho apresentou a implementação do GUM no ensaio de K_{IC} e os resultados obtidos, de forma similar ao encontrado ao encontrado no ensaio de outros materiais metálicos, preenchendo uma lacuna da literatura.

CONCLUSÕES

Os passos do GUM foram desdobrados para o cálculo da incerteza de medição do ensaio de K_{IC} . Para facilitar a replicação do cálculo, uma planilha eletrônica foi estruturada.

A planilha foi utilizada no ensaio de quatro corpos de prova, permitindo uma análise de quais fontes de incerteza consideradas mais colaboraram para a incerteza expandida. Conclui-se que a maior contribuição para a incerteza foi devido à variabilidade entre corpos de prova.

Espera-se, com esse trabalho, incentivar outros laboratórios a implementar o GUM em ensaios de tenacidade à fratura, e preencher uma lacuna da literatura nesse campo. Trabalhos futuros podem focar na realização de ensaios com outros materiais e geometrias de corpos de prova, visando avaliar o comportamento da incerteza para diferentes condições de ensaio.

REFERÊNCIAS

1. AIAG. Measurement Systems Analysis Reference Manual. Automotive Industry Action Group. 4th Issue. 2010.
2. BONO, M. J.; SEUGLING, R. M.; KROLL, J. J.; NEDERBRAGT, W. W. An uncertainty analysis of tool setting methods for a precision lathe with a B-axis rotary table. *Precision Engineering*. 2010; 34(2): p. 242-252.
3. BOUHOUCHE, S.; ZIANI, S.; MENTOUR, Z.; BATSB, J. Uncertainty estimation of mechanical testing properties using sensitivity analysis and stochastic modelling. *Measurement*. 2015; 62: p. 149-154.
4. CHOWDURY, M.S.; SONG, C.; GAO, W. Probabilistic fracture mechanics with uncertainty in crack size and orientation using the scaled boundary finite element method. *Computer and Structures*. 2014; 137: 93-103.
5. FABRICIO, D. A. K.; HAAG, J.; HACK, P. S.; CATEN, C. S. T.; SANTOS, B. P.; STROHA-ECKER, T. R. Cálculo da Incerteza de Medição para Acreditação do Ensaio de Anisotropia. In: 68th ABM International Congress, Belo Horizonte, 2013.
6. HACK, P. S.; CATEN, C. S. T. Measurement Uncertainty: Literature Review and Research Trends. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2012; 61(8): p. 2116-2124.
7. ISO 12135: Metallic materials - Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness. Geneva: ISO, 2002, Cor. 1:2008.
8. JCGM. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). Joint Committee for Guides in Metrology, 2008a.
9. JCGM. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM). Joint Committee for Guides in Metrology, 2008b.
10. JORNADA, D. H. Implantação de um guia orientativo de incerteza de medição para avaliadores de laboratório da Rede Metrológica RS. Porto Alegre: UFRGS, 2009.
11. STROHA-ECKER, T. R. Mecânica da Fratura. UFRGS, 2011.

Figura 4. Contribuição de incerteza de cada fonte

Tabela 3. Resultados do ensaio

Amostra	F_Q [N]	B [mm]	B_N [mm]	W [mm]	S [mm]	$K_Q = K_{IC}$ [N/mm ^{3/2}]
1	1825	6,03	6,03	11,96	47,74	1011,18
2	1866	6,05	6,05	11,83	47,74	998,40
3	1713	6,09	6,09	11,93	47,74	945,81
4	1700	6,07	6,07	12,05	47,74	923,48
Média	1838,83	6,06	6,06	11,94	47,74	969,72