

AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS DE UM MICRODURÔMETRO PARA MEDIÇÃO DE DANOS

Tanius Rodrigues Mansur

CDTN/CNEN, Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Cidade Universitária, Pampulha, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: tanius@cdtn.br

Meinhard Sesselman

Universidade Federal de Minas Gerais/Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG, Campus, Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: meinhard@demec.ufmg.br

Emerson Giovani Rabello

CDTN/CNEN, Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Cidade Universitária, Pampulha, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: egr@cdtn.com.br

Ernani Sales Palma

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC Minas & UFMG/Departamento de Engenharia Mecânica. Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: palma@pucminas.br

Resumo. Dureza é uma propriedade amplamente utilizada em estudos e pesquisas mecânicas e metalúrgicas. A calibração normalmente utilizada para este tipo de ensaio é feita por faixas, utilizando-se para isto um bloco padrão com micro-dureza conhecida. O que se propõe neste trabalho é fazer o balanço de incertezas que acompanham as grandezas envolvidas na formulação da micro-dureza Vickers, propiciando assim, uma maneira adequada e exata da sua análise quantitativa.

Palavras-chave: calibração, análise de incertezas, dureza, erros de medição

1. INTRODUÇÃO

Danos em materiais, no contexto da mecânica do contínuo, pode ser definido como uma propriedade que diminui a resistência do componente, podendo inclusive provocar a sua falha. O processo de criação de danos consiste na nucleação de descontinuidades superficiais (micro-trincas) e/ou volumétricas (vazios ou micro poros) no material (Collins, 1993, Palma et al, 2001 e Lemaitre and Chaboche, 1985).

Existem várias técnicas distintas para medição de danos, cada uma apresentando vantagens e desvantagens, em função das suas aplicações (Lemaitre and Dufailly, 1987). Dentre elas, a avaliação do dano baseada na medição da micro-dureza é bastante utilizada por ser um método não destrutivo, de baixo custo e relativamente simples de ser aplicado. Entretanto, deve-se ter um conhecimento profundo das incertezas envolvidas no processo de medição, já que o valor do mensurando (micro-dureza) pode apresentar variações relativamente grandes de amostra para amostra. Ao contrário, podem ocorrer casos onde as variações dos danos são pequenas, ou mesmo não ocorrer variação alguma. Desta forma, conhecendo-se as incertezas do processo de medição, pode-se explicar as causas da ocorrência do dano e determinar quantitativamente, com uma confiabilidade pré-definida, o seu valor real. Assim, apesar da característica aleatória do dano, e em consequência da micro-dureza, pode-se obter resultados confiáveis da sua extensão.

A determinação do dano D é realizada de maneira indireta, através da medição da micro-dureza do material, utilizando-s e a Eq. (1). HV é a micro-dureza do material danificado e HV^* é a micro-dureza do material não danificado (material virgem).

$$D = 1 - \frac{HV}{HV^*} \quad (1)$$

O objetivo deste trabalho consiste na realização de uma análise das incertezas envolvidas no processo de medição da micro-dureza Vickers em um microdourômetro marca Wolpert, possibilitando assim avaliações confiáveis dos danos causados em aços SAE 8620, quando submetidos à fadiga.

2. METODOLOGIA

A medição da micro-dureza foi realizada em um microdourômetro marca Wolpert. O ensaio consiste em aplicar uma força conhecida P, usando um punção, sobre a superfície onde se quer obter a dureza. Como consequência da aplicação da força, uma área A é impressa no material através da deformação plástica. A dureza Vickers HV é definida pela relação entre a carga aplicada e a área impressa (Dieter, 1998). O ensaio de dureza Vickers usa como punção, um diamante piramidal de base quadrada, com ângulo entre as faces opostas de $\alpha = 136^\circ$ (INMETRO, 1998). O valor da área é calculado a partir da medição dos comprimentos das diagonais (d) impressas na superfície impressa. Assim, o valor da micro-dureza Vickers é obtido através da equação (Dieter, 1998), onde m é a massa e g a aceleração da gravidade local.

$$HV = \frac{2mg \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2} \quad (2)$$

A faixa de valores selecionada foi entre 200 a 300 HV , já que a micro-dureza esperada para o aço SAE 8620 encontra-se neste intervalo.

A análise das incertezas do processo de medição da micro-dureza foi realizada através das avaliações de incertezas: da balança utilizada na medição das massas usadas no microdourômetro, da massa (m), do ângulo do punção do microdourômetro, do punção e das diagonais (d) do microdourômetro.

Em cada uma das etapas acima, foram determinadas as incertezas padrão (u) para cada fonte de incerteza selecionada. Posteriormente, calculou-se a incerteza combinada (u_c), a qual reflete a influência de todas as incertezas padrão (u_i) no resultado final. Ambos tipos de incertezas expressam a incerteza do resultado da medição com uma confiabilidade $P=68\%$ (± 1 desvio padrão). O cálculo de (u_c) foi realizado através da equação

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (3)$$

Como em engenharia trabalha-se geralmente com níveis de confiança de 95%, calcula-se a incerteza expandida (U) multiplicando-se a incerteza combinada por um fator de correção ou expansão (K), ou seja, $U=K.u_c$.

A seleção do valor exato para o valor apropriado do fator de expansão (K) deve considerar o nível de confiança desejado e o número de graus de liberdade associado ao processo de medição. Com estes dois parâmetros, obtém-se o valor do K consultando-se tabelas com o coeficiente de Student t. O número de graus de liberdade (v_{ef}) é determinado através da equação

$$v_{ef} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4}{v_i}} \quad (4)$$

3. RESULTADOS

3.1. Análise de Incertezas da Massa

Utilizou-se uma massa total $m = 200$ g nas medições da micro-dureza. Esta massa é composta de uma massa de 195 g mais 5 g do próprio equipamento. A análise de incertezas foi efetuada na massa de 195 g.

3.1.1. Análise de Incertezas da Balança

Foi utilizada uma Balança Mettler, Modelo AT 201 com carga máxima de 200 g. A menor divisão da balança é de 0,01 mg. Utilizou-se como Valor Verdadeiro Convencional (VVC), padrões do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais. Os valores dos padrões utilizados, assim como as respectivas incertezas expandidas estão mostradas na Tab. 1.

Tabela 1. Massas padrões utilizadas para análise de incertezas da balança Mettler

Valor verdadeiro convencional VVC [g]	Incertezas expandidas U_{95} ($K = 2$) [g]
10,39301	$3,7 \times 10^{-5}$
78,93075	$1,2 \times 10^{-4}$
101,62572	$1,1 \times 10^{-4}$

O Valor Verdadeiro Convencional utilizado para realização da análise de incertezas a balança, foi a soma de valores da Tab. (1). Os resultados das medições, da média das indicações (MI) e do desvio padrão (s) estão mostrados na Tab. 2.

Tabela 2. Resultados das medições com a balança Mettler

VVC [g]	Medições [g]								Média MI [g]	Desvio padrão s [g]
	1	2	3	4	5	6	7	8		
190,94948	190,94919	190,94914	190,94914	190,94921	190,94921	190,94921	190,94921	190,94922	190,94919	$3,3 \times 10^{-5}$

Os resultados da análise de incertezas completos da balança Mettler estão mostrados na Tab. 3. Nesta tabela estão mostrados todas as fontes de incertezas e as suas composições, ou seja, as parcelas sistemáticas e as respectivas incertezas padrão. Estão mostrados também nesta tabela, a incerteza combinada e o valor da incerteza expandida U.

Tabela 3. Determinação das incertezas obtidas na análise da balança Mettler

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Correção [mg]	Valor bruto [mg]	Tipo de distribuição	Divisor (K_i)	Incertezas padrão u_i [mg]	Graus de liberdade (v)
NL	Não linearidade	+ 0,29	0,013	normal	1	0,013	7
R	Resolução	-	0,005	Retangular	$\sqrt{3}$	0,003	∞
U_p	Incerteza do padrão	-	0,27	normal	2	0,135	∞
C_c	Correção combinada	0,29					
u_c	Incerteza padrão combinada (68%)			normal		0,136	∞
U	Incerteza expandida (95%)			normal		0,272	

Como as massas do microdourômetro e as utilizadas como padrão são feitos do mesmo material (aço inoxidável), o empuxo do ar sobre as mesmas não foi considerado nesta análise. O Resultado de Medição (RM) deve ser expresso como:

$$RM = MI + C \pm U_{95} \quad (5)$$

ou seja, $RM = 190,94919 - 0,29000 \pm 0,00003$ g, então $R = 190,65190 \pm 0,00003$ g.

3.1.2. Análise de Incertezas da Massa

Foram realizadas oito medições da massa a ser analisada (massa padrão $m=195$ g). Os seguintes resultados foram obtidos: Média das indicações $MI = 194,9627$ g e desvio padrão $s = 5,2 \times 10^{-6}$ g. Os resultados da análise de incertezas da massa $m = 195$ g estão mostrados na Tab. 4. Nesta tabela estão mostrados as duas fontes de incertezas analisadas e as suas composições. Estão mostrados ainda a incerteza combinada e o valor da incerteza expandida U . Como incerteza da balança utilizou-se o resultado obtido no balanço de incertezas para a balança Mettler, com o peso de 190 g.

Tabela 4. Determinação das incertezas para a massa de 195 g

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Correção [mg]	Valor bruto [mg]	Tipo de distribuição	Divisor K_i	Incert. padrão u_i [mg]	Graus de liberdade v
IR	Indicações Repetidas	-	0,016	normal	1	0,016	9
U_B	Incerteza da Balança	0,29	0,272	normal	2	0,136	∞
C_c	Correção combinada	0,29					
u_c	Incerteza padrão combinada			normal		0,137	∞
U	Incerteza expandida (95%)			normal		0,274	

O resultado da medição RM torna-se: $RM = (199,96303 \pm 0,00027) \text{ g.}$

3.2. Análise de Incertezas do Ângulo do Punção do Microdourômetro Wolpert

3.2.1. Análise de Incertezas do comparador ótico Mitutoyo, PJ 300

Utilizou-se um padrão Mitutoyo para ângulos e curvas para determinar as incertezas do comparador ótico. A menor divisão da escala de ângulos do padrão utilizado é de 1 minuto ($1'$). Como o comparador mede em quadrantes de 90° , analisou-se o ângulo de 45° . Isto se deve ao fato de que a soma $90^\circ + 45^\circ = 135^\circ$. Os resultados obtidos nas medições foram: Média $MI = 44^\circ 53'$. Desvio padrão $s = 2'$. O resultado do balanço das incertezas do equipamento Mitutoyo PJ 300 quando se mede um ângulo de 45° está mostrado na Tab. 5.

Tabela 5. Determinação das incertezas obtidas na calibração de comparador ótico Mitutoyo PJ 300

Fontes de incertezas		Efeitos sistê-máticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição		Correção [minutos]	Valor bruto [min.]	Tipo de distri-buição	Divi-sor K_i	Incert. padrão $u_i(\text{min.})$
NL	Não Linearidade	7	0,6	normal	1	0,6	9
R	Resolução limitada	-	0,5	retangular	$\sqrt{3}$	0,3	∞
C_c	Correção combinada	7					
u_c	Incerteza padrão combinada			normal		0,7	17
U	Incerteza expandida (95%)			normal		1,5	

O resultado da medição pode ser expresso por $RM = 45^\circ \pm 1,5'$

3.2.2. Análise de Incertezas do ângulo do punção do microdourômetro Wolpert

Após a avaliação das incertezas do comparador ótico para o ângulo de 45° , foram realizadas medições do ângulo da ponta do punção do microdourômetro. Os resultados das medições do ângulo do punção do microdourômetro foram: Média $MI = 134^\circ 50'$. Desvio padrão $s = 10'$. O resultado do balanço das incertezas para as medições do ângulo do punção está mostrado na Tab. 6.

Tabela 6 - Determinação das incertezas do ângulo do punção do microdourômetro

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição		Correção [minutos]	Valor bruto [minutos]	Tipo de distri-buição	Divisor K_i	Incerteza padrão u_i (minutos)
IR	Indicações repetidas	-	3,16	normal	1	3,16	9
U_p	Incerteza do padrão	7	1,5	normal	2,16	0,7	17
C_c	Correção combinada	7					
u_c	Incerteza padrão combinada			normal		3,3	11
U	Incerteza expandida (95%)			normal		7,4	

O resultado da medição pode ser expresso por $RM = (134^\circ 57') \pm 7'$.

3.3. Análise de Incertezas do Retículo do Microdourômetro Wolkert

Utiliza-se o retículo do microdourômetro para a medição dos diâmetros da indentação. O diâmetro d utilizado na Eq. (2) que permite o cálculo de HV é o diâmetro médio obtido a partir da medição das duas diagonais, ou seja, $d = (d_1 + d_2)/2$. Para calcular os dois diâmetros, d_1 e d_2 , utiliza-se o mesmo retículo, bastando para isto, girá-lo de 90° .

A análise de incertezas do retículo foi feita utilizando-se um padrão Mitutoyo (Média $MI = 40,1\mu\text{m}$ e desvio padrão $s = 0,08\mu\text{m}$). O balanço das incertezas está mostrado na Tab. 7.

Tabela 7 - Determinação das incertezas obtidas para a escala de medição de microdourômetro

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
Símbolo	Descrição	Correção [μm]	Valor bruto [μm]	Tipo de distribuição	Divisor K	Incertezas padrão [μm]	Graus de liberdade v
NL	Não Linearidade	-0,1	0,03	normal	1	0,03	5
R	Resolução limitada	-	0,25	retangular	$\sqrt{3}$	0,15	∞
C _c	Correção combinada	-0,1					
u _c	Incerteza padrão combinada			normal		0,15	∞
U	Incerteza expandida (95%)			normal		0,30	

O resultado da medição pode ser expresso por $RM = (40,0 \pm 0,3) \mu\text{m}$.

4. Avaliação consolidada das incertezas

A medição da dureza Vickers é uma medição indireta, pois envolve a determinação do valor associado ao mensurando a partir da combinação de 4 grandezas por meio de uma expressão matemática, como mostra a Equação (2). O valor para aceleração da gravidade considerado nesta análise, foi $g = 9,87 \pm 0,01 \text{ m/s}^2$.

As grandezas m (massa), g (constante gravitacional), α (ângulo de punção) e d (diâmetro médio das duas diagonais da impressão) são estatisticamente independentes pois são medidos por instrumentos diferentes. Como a Equação (2) é uma combinação de multiplicação e divisão, a incerteza relativa combinada é estimada por (Gonçalves Jr., 2001, Link, 1997 e Rosário e Ribeiro, 1994)

$$(u(HV))^2 = \left(\frac{\partial HV}{\partial m} u(m) \right)^2 + \left(\frac{\partial HV}{\partial g} u(g) \right)^2 + \left(\frac{\partial HV}{\partial d} u(d) \right)^2 + \left(\frac{\partial HV}{\partial \alpha} u(\alpha) \right)^2 \quad (6)$$

Usando os valores das incertezas calculadas anteriormente obtém-se: $u(HV) = 1,69 \frac{\text{k}\text{g}\text{f}}{\text{mm}^2}$

Para expandir $u(HV)$ é necessário calcular v_{eff} . Para isto é necessário uniformizar as unidades. Dividindo-se a Eq. (7) por HV , obtendo-se $\frac{u(HV)}{HV} = 0,0075$. Substituindo-se os valores das grandezas encontra-se $v_{eff} = \infty$. Com $v_{eff} = \infty$, obtém-se da tabela de coeficientes de Student um fator de correção $K = 2$. Assim,

$$U_{95(HV)} = \mu_{(HV)} \times t_{(95,45;\infty)} = 1,69 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2} \times 2 = 3,38 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$$

A micro-dureza HV pode determinada através da substituição dos valores obtidos na Eq. (3). Assim, $HV = 226 \text{ kgf/mm}^2$, ou seja, O número $HV = 226 HV$.

A incerteza expandida obtida no resultado final da micro-dureza é $3,38 \text{ kgf/mm}^2$, ou seja, $3,38 HV$. O número HV é aproximadamente $3,4 HV$. O Resultado final da medição, após serem considerados todas as fontes de incertezas pertinentes e as respectivas correções é $RM = (226,0 \pm 3,4) HV$.

5. CONCLUSÕES

Estudando-se as incertezas relacionadas à massa, à aceleração da gravidade, ao ângulo do punção e ao retículo de medição do microdurômetro, conclui-se que a maior contribuição para a incerteza total é o valor relacionado ao retículo do microdurômetro, com $U_{95\%} = 0,30 \mu\text{m}$.

Como o retículo é constante para todos os pesos, pode-se concluir que a incerteza de qualquer medição está relacionada a ele e, é da ordem de $3,4 HV$. Assim, para se obter menores valores das incertezas nas medições da micro-dureza, devem ser utilizados retículos de medições dos diâmetros de melhor qualidade.

6. REFERÊNCIAS

- Alvarenga Jr., A., Mansur, T. R e Palma, E. S., 2001, “Influência do Dano de Fadiga sobre as Propriedades do Aço 8620”, Anais do XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM, (Anais em CD-ROM), Vol. 12, pp.209-216, Uberlândia-MG.
- Collins, J. A., 1993, “Failure of Materials in Mechanical Design”, Ed. John Wiley & Sons, 2. Ed., p289.
- Dieter, G.E., 1998, “Mechanical Metallurgy”, Ed. McGraw-Hill Books Company, SI Edition, p.331.
- Gonçalves Júnior,A., A., 2001, Metrologia. Parte I. LabMetro UFSC, Florianópolis.
- INMETRO, 1998, Guia para Expressão da Incerteza de Medição.
- Lemaître, J. and Chaboche, J. L., 1985, “Mécanique des matériaux solides” Ed. Bordas, Paris, p.54.
- Lemaître, J. and Dufailly, J., 1987, “Damage Measurements”, Engineering Fracture Mechanics. Vol. 28, N. 516, pp 643-661.
- Link, W., 1997, Metrologia Mecânica : Expressão da Incerteza de Medição, INMETRO.
- Rosário, P.P.N. e Ribeiro, C.G.L., 1994, “Análise de Erros em Sistemas de Medição”, INSTEC, p.19-23.

UNCERTAINTY ANALYSIS OF A MICRO-HARDNESS VICKERS EQUIPMENT

Tanius Rodrigues Mansur

CDTN/CNEN, Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Cidade Universitária, Pampulha, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: tanius@cdtn.br

Meinhard Sesselman

Federal University of Minas Gerais/Mechanical Engineering Department, UFMG, Campus, Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: meinhard@demec.ufmg.br

Emerson Giovani Rabello

CDTN/CNEN, Rua Prof. Mário Werneck, s/n, Cidade Universitária, Pampulha, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: egr@cdtn.br

Ernani Sales Palma

Pontifical Catholic University of Minas Gerais - PUC Minas & UFMG/ Mechanical Engineering Department. Belo Horizonte, Minas Gerais, e-mail: palma@pucminas.br

Abstract. Hardness is a property of primary interest to engineers. In this paper a determination of the uncertainties of the micro-hardness Vickers, during its measurement procedure, was performed. It is also presented the consolidated evaluation of the uncertainties through an error propagation study. Finally, it was reported in detail a measurement result and its uncertainty.

Keywords: calibration, Uncertainty analysis, Measurement procedure