



EXPRESSÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO DA DUREZA VICKERS - PARÂMETROS RELEVANTES

Jôneo L. Nascimento

Laboratório de Metalografia e de Dureza - Instituto Nacional de Tecnologia
Av. Venezuela, 82, 20081-310, Rio de Janeiro, RJ – joneolop@int.gov.br

Fábio S. Pires

Laboratório de Metalografia e de Dureza - Instituto Nacional de Tecnologia
Av. Venezuela, 82, 20081-310, Rio de Janeiro, RJ - fabiosou@int.gov.br

Ibrahim Abud

Laboratório de Metalografia e de Dureza - Instituto Nacional de Tecnologia
Av. Venezuela, 82, 20081-310, Rio de Janeiro, RJ - ibrahim@int.gov.br

Vilson Berilli Mendes

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal Fluminense
Grupo de Armas - Instituto de Pesquisa da Marinha
Rua Ipiru nº 2, 21931-090, Rio de Janeiro, RJ - vberilli@ipqm.mar.mil.br

Fabiana R. Leta

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal Fluminense
R. Passo da Pátria, 156, 24210-240, Niterói, RJ – fabiana@ic.uff.br.

Resumo. *Atualmente a estimativa da incerteza de medição em máquinas de dureza Vickers na indústria brasileira é praticamente inexistente ou realizada de maneira empírica. Sua forma de cálculo mais utilizada leva em consideração apenas a fonte aleatória de incerteza (U tipo A) e a incerteza declarada nos certificados de calibração dos blocos padrão de dureza utilizados para calibrar as máquinas (U tipo B). Desta forma a influência dos valores relativos à incerteza da força de medição (U_f), à incerteza do ângulo entre as faces opostas do penetrador de diamante (U_d) e ao sistema de medição de impressões (U_d) é desconsiderada na estimativa da incerteza relativa ao ensaio sem que sua relevância seja mensurada. O presente trabalho tem como objetivo quantificar e avaliar a influência da incerteza de medição dos parâmetros relevantes ao ensaio de dureza Vickers, verificando assim sua relevância na correta expressão da incerteza de medição .*

Palavras-chave. *Dureza Vickers, Incerteza, Dureza*

1. INTRODUÇÃO

A área de dureza vem sendo objeto de estudo em Metrologia, especialmente por envolver um ensaio bastante usual da indústria, que ainda se baseia em estimativas de incerteza empíricas. O objetivo do presente artigo é apresentar e avaliar a incerteza de medição de ensaios de dureza Vickers.

Para analisar os parâmetros relevantes na expressão da incerteza de medição de dureza Vickers, torna-se importante apresentar as grandezas envolvidas. Este tipo de ensaio se baseia na resistência que um corpo de prova, de um dado material, oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de 136° (α), sob uma determinada carga. O valor de dureza Vickers (HV) consiste no quociente da carga aplicada (F) pela área de impressão (A) impressa no corpo de prova ensaiado. A máquina de ensaio não fornece o valor da área de impressão da pirâmide, mas permite obter, por meio de um conjunto óptico, as medidas das diagonais (d_1 e d_2) formadas pelos vértices opostos da base da pirâmide. Conhecendo as medidas das diagonais, é possível calcular a área da pirâmide. Na determinação da dureza do material ensaiado é, então, utilizada a média das diagonais medidas, d .

Conhecendo-se os parâmetros principais envolvidos no ensaio de dureza Vickers é possível então avaliar a incerteza de medição, conforme descrito no item 2 deste artigo.

2. EXPRESSÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Para que fosse possível realizar a avaliação da incerteza de medição dos diversos parâmetros que envolvem a medição da dureza Vickers, foi realizada a calibração da escala HV 10 de um durômetro de fabricação OTTO WOLPERT, modelo 2Rc pelos métodos direto e indireto descritos na norma NBR NM 188-2. A metodologia de calibração direta consiste na verificação das forças de medição, penetrador de diamante e do sistema de medição de impressões enquanto a calibração indireta é realizada pela medição de dureza em blocos padrão calibrados por organismos reconhecidos internacionalmente. Uma vez realizada a calibração da escala selecionada, foi possível quantificar a incerteza de medição de cada um dos parâmetros envolvidos no ensaio de dureza Vickers.

De posse dos resultados obtidos na calibração do equipamento iniciou-se uma análise preliminar dos resultados, nesta fase foi constatado que apenas as fontes de incerteza aleatória ($U_{\text{tipo A}}$) e a incerteza relativa aos blocos padrão de dureza (U_{blocos}) poderiam ser consideradas de forma direta para o cálculo da incerteza de medição.

O valor de dureza Vickers é obtido a partir da expressão 1 e os valores de incerteza $U_{\text{tipo A}}$ e U_{blocos} são calculados segundo as Eq.(2) e Eq.(3) respectivamente.

$$HV = 0,102 \times \frac{2F \times \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} \quad (1)$$

$$U_{\text{TipoA}} = \frac{S}{\sqrt{N}} \quad (2)$$

S = desvio padrão

N = numero de medições

$$U_{\text{Blocos}} = \frac{U_{\text{declarada}}}{K_{\text{declarado}}} \quad (3)$$

$U_{\text{declarada}}$ = Incerteza do padrão utilizado na calibração

K = coeficiente de abrangência

As outras grandezas de entrada se encontram em outras unidades que não unidades de dureza Vickers. Para que a influência da incerteza de cada um destes parâmetros no resultado final da

incerteza de medição possa ser mensurada, foi necessário determinar os coeficientes de sensibilidade (CS) de cada uma das fontes de incerteza. Estes coeficientes descrevem como a grandeza de saída (HV) irá se comportar diante da variação de uma das grandezas de entrada (força, ângulo do penetrador, diagonal da impressão) sendo calculado através da derivada parcial da Eq.(1) em função de cada uma das grandezas de entrada, como pode ser observado na Eq.(4):

$$CS_i = \frac{\partial HV}{\partial x_i} \quad (4)$$

As Eq.(5), Eq.(6) e Eq.(7) apresentam respectivamente os coeficientes de sensibilidade das componentes de incerteza relativas a força de medição, ângulo do penetrador e instrumento de medições de impressões.

$$CS_F = \frac{\partial HV}{\partial x_F} = 0,204 \times \frac{\text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2} \quad (5)$$

$$CS_\alpha = \frac{\partial HV}{\partial x_\alpha} = 0,102 \times \frac{F \times \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2} \quad (6)$$

$$CS_d = \frac{\partial HV}{\partial x_d} = -0,408 \times \frac{F \times \text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^3} \quad (7)$$

A incerteza padrão combinada é dada pela raiz quadrada positiva da variância combinada (U_c^2) conforme Eq.(8).

$$U_c^2 = \sum_{i=1}^N [CS \times U_i]^2 \quad (8)$$

Desenvolvendo a Eq.(8) e aplicando os valores dos parâmetros que estão sendo verificados pode-se apresentar um modelo do cálculo da incerteza de medição para dureza Vickers (Eq.(9)).

$$U_c = \sqrt{\left[CS_{\text{tipoA}} \times \frac{S}{\sqrt{N}}\right]^2 + \left[CS_{\text{blo cos}} \times \frac{U_{\text{declarada}}}{K_{\text{declarado}}}\right]^2 + [CS_F \times U_F]^2 + [CS_\alpha \times U_\alpha]^2 + [CS_d \times Ud]^2} \quad (9)$$

Como as unidades de incerteza relativas a incerteza dos blocos e a incerteza tipo A se encontram na mesma unidade da grandeza de saída (HV) os seus coeficientes de sensibilidade são iguais a 1, simplificando a Eq.(9) obtém-se a Eq.(9a).

$$U_c = \sqrt{\left[\frac{S}{\sqrt{N}}\right]^2 + \left[\frac{U_{\text{declarada}}}{K_{\text{declarado}}}\right]^2 + [CS_F \times U_F]^2 + [CS_\alpha \times U_\alpha]^2 + [CS_d \times Ud]^2} \quad (9a)$$

O modelo proposto na Eq.(9a) será comparado com o modelo utilizado usualmente nas indústrias, Eq.(10), para se avaliar a relevância e influência dos parâmetros relativos a carga, ângulo do penetrador e sistema de medição de impressões.

$$U_c = \sqrt{\left[\frac{S}{\sqrt{N}}\right]^2 + \left[\frac{U_{declarada}}{K_{declarado}}\right]^2} \tag{10}$$

3. RESULTADOS

A escala HV10 foi calibrada em três (03) diferentes faixas de dureza de maneira a cobrir toda sua extensão para a medição de materiais metálicos.

Para a avaliação da incerteza de medição do parâmetro força de medição foi utilizado um instrumento de medição de força calibrado segundo a norma ISO 376 e que atendesse seus requisitos, enquadrando-se na classe 1. Foram realizadas três (03) medições de força, defasadas de 120°, em três (03) diferentes posições distribuídas ao longo do curso do porta penetrador. A Tabela (1) apresenta os valores obtidos durante a calibração e a incerteza de medição da força.

Tabela 1. Resultados obtidos na calibração da força de medição.

Posição do porta penetrador	Valores obtidos (N)			Média	Erro %	U _c (N)
	0°	120°	240°			
1	97,42	97,41	97,36	97,40	-0,68	0,046
2	97,40	97,31	97,15	97,29	-0,80	
3	97,36	97,32	97,23	97,30	-0,78	

O penetrador de diamante utilizado para a medição da dureza Vickers deve ser submetido a uma verificação de forma onde, dentre outras características geométricas, o ângulo entre as faces opostas da pirâmide de diamante deve ser determinado e este deve estar entre 135,5° e 136,5°. Diante da impossibilidade técnica de se realizar tal verificação, foi utilizado um penetrador calibrado por uma entidade internacionalmente reconhecida. A Tabela (2) apresenta os valores relativos ao ângulo entre as faces opostas do penetrador e a incerteza de medição encontrada.

A calibração do sistema de medição de impressões foi realizada pela medição da projeção da imagem de uma micro escala calibrada. Foram realizadas cinco (05) medições em cinco (05) pontos distribuídos ao longo de sua faixa de medição. A Tabela (3) apresenta os resultados obtidos na calibração do sistema de medição de impressões.

Foram realizadas cinco (05) medições em três (03) blocos padrão calibrados distribuídos em três (03) faixas de dureza. As Tabelas (4) e (5) apresentam respectivamente os dados fornecidos nos certificados de calibração dos blocos e os resultados obtidos nas medições realizadas.

Na Tabela (6) são apresentados os valores referentes a incerteza de medição e aos diferentes coeficientes de sensibilidade relativos aos parâmetros citados anteriormente.

Tabela 2. Valores obtidos no certificado de calibração do penetrador.

Valor nominal do ângulo	Valor Medido	Erro %	Uc
136 °	136°	0,00	0,3°

Tabela 3. Resultados obtidos na calibração do sistema óptico.

OBJETIVA DE 140X					
VALOR NOMINAL	100	200	400	600	800
VALORES MEDIDOS (µm)	100,3	200,3	399,6	599,9	800,3
	100,2	199,7	400,0	599,2	800,3
	100,1	201,1	400,8	601,5	800,6
	100,8	201,8	400,6	601,1	799,9
	99,9	198,4	401,7	599,2	801,0
MÉDIA	100,3	200,3	400,5	600,2	800,4
ERRO%	0,26%	0,13%	0,14%	0,03%	0,05%
Uc	0,268	0,626	0,423	0,528	0,284

Tabela 4. Dados fornecidos nos certificados de calibração dos blocos.

Dados fornecidos nos certificados		
Faixa de dureza	U bloco	
	U95%	Ucombinada
127	2,00	1,00
681	4,00	2,00
833	5,00	2,50

Tabela 5. Resultados obtidos na medição de dureza.

Medição de dureza Vickers									
Faixa de dureza	Pontos de medição					Média	Erro %	Desvio padrão	U tipoA
	1	2	3	4	5				
127	127,3	132,2	130,8	129,1	129,9	129,9	2,29%	1,847	0,826
681	694,1	692,9	692,9	695,8	695,0	694,1	2,06%	1,310	0,586
833	830,9	837,1	849,6	847,9	839,9	841,1	0,83%	7,735	3,459

Tabela 6. Incerteza de medição dos parâmetros considerados.

Faixa de dureza (HV10)	U tipo A	U tipo B	Força		Ângulo α		Sistema de medição	
			CS _F	U _F (N)	CS _{α}	U _{α} (°)	CS _d	U _d (mm)
127	0,827	1,000	$1,3 \cdot 10^{-6}$	0,046	$2,6 \cdot 10^{-5}$	0,300	$6,9 \cdot 10^{-7}$	$0,50 \cdot 10^{-3}$
681	0,586	2,000	$7,1 \cdot 10^{-6}$	0,046	$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,300	$8,5 \cdot 10^{-6}$	$0,53 \cdot 10^{-3}$
833	3,459	2,500	$8,6 \cdot 10^{-6}$	0,046	$1,7 \cdot 10^{-4}$	0,300	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$0,47 \cdot 10^{-3}$

De posse dos valores fornecidos na Tab. (7), foi possível analisar-se a estimativa da incerteza de medição de dureza Vickers utilizando-se o modelo tradicionalmente utilizado e o modelo proposto no presente trabalho. Os valores da estimativa da incerteza de medição obtidos pelos dois modelos são apresentados na Tab. (7).

Tabela 7. Incerteza combinada obtida pelos diferentes modelos.

Faixa de dureza (HV10)	U _c (HV10)		Diferença
	Modelo tradicional	Modelo proposto	
127	1,297026	1,297032	0,0005 %
681	2,084082	2,084102	0,0010 %
833	4,267866	4,267878	0,0003 %

4. CONCLUSÕES

Tendo em vista os resultados relativos a incerteza de medição obtidos segundo o modelo proposto e o modelo tradicionalmente utilizado na indústria, podemos afirmar que as fontes de incerteza referentes ao modelo proposto, ou seja, a força de ensaio, sistema de medição de impressões e angulo do penetrador de diamante, não contribuíram de forma significativa para a expressão da incerteza associada ao ensaio.

Desta forma, ao se utilizar o modelo matemático tradicional que contempla apenas a fonte aleatória de incerteza e a incerteza associada ao padrão de referência utilizado, estará sendo realizada uma estimativa adequada da incerteza de medição do ensaio de dureza Vickers.

Vale ressaltar que este estudo contemplou apenas uma das cargas de medição utilizadas para a determinação da dureza Vickers (98,1 N) e que a conclusão da não relevância das fontes de incerteza associadas a força de ensaio, sistema de medição de impressões e angulo do penetrador de diamante não pode ser estendida para toda a gama de cargas de ensaios disponíveis sem uma análise prévia.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPERJ pelo apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Barbato, G., Desogus, S., Germak, A., 1994, "Description of some Systematic Effects on HV Measurement", Rapporto Tecnico Interno R380 IMGC, Torino, Itália
- Barbato, G., Bell, T., Germak, A., Mazzoneli, F., Northcote, D., 1997, "Analysist of the Comparison of IMGC-CNR (Italy) and NML-CSIRO (Australia) HV Scales performed following the ISO Guide on Uncertainty Evaluation" Proceedings of XIV IMEKO, Tampere, Finlândia, 1997
- Yamamoto, H., Yamamoto, T., 2000, "A Study of the HRC Hardness Standards- Evaluation Method using Vickers Diamond Identers", Proceedings of XVI IMEKO.
- ABNT, INMETRO, SBM, 1998, "Guia para a Expressão da Incerteza de Medição", 2^a ed. Brasileira do Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Rio de Janeiro.

EXPRESSION OF THE UNCERTAINTY OF MEASUREMENT OF THE VICKERS HARDNESS - RELEVANT PARAMETERS

Jôneo L. Nascimento

Laboratório de Metalografia e de Dureza - Instituto Nacional de Tecnologia
Av. Venezuela, 82, 20081-310, Rio de Janeiro, RJ – joneolop@int.gov.br

Fábio S. Pires

Laboratório de Metalografia e de Dureza - Instituto Nacional de Tecnologia
Av. Venezuela, 82, 20081-310, Rio de Janeiro, RJ - fabiosou@int.gov.br

Ibrahim Abud

Laboratório de Metalografia e de Dureza - Instituto Nacional de Tecnologia
Av. Venezuela, 82, 20081-310, Rio de Janeiro, RJ - ibrahim@int.gov.br

Vilson Berilli Mendes

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal Fluminense
Grupo de Armas - Instituto de Pesquisa da Marinha
Rua Ipiru nº 2, 21931-090, Rio de Janeiro, RJ - vberilli@ipqm.mar.mil.br

Fabiana R. Leta

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal Fluminense
R. Passo da Pátria, 156, 24210-240, Niterói, RJ – fabiana@ic.uff.br.

Abstract. Nowadays in the Brazilian industry, the measurement uncertainty estimative of Vickers hardness machines is practically inexistent or accomplished in an empiric way. Usually these measurements takes in consideration just the random source of uncertainty (U type A) and the declared uncertainty in the certificates of calibration of the standard of hardness used to gage the machines (U type B). The influence of the relative values to the uncertainty of the measurement force (U_f), to the uncertainty of the angle among the opposite faces of the diamond indenters (U_d) and to the system of measurement of indentations (U_d) is not respected in the estimate of the relative uncertainty. Its relevance is not measured. This work intends to quantify and evaluate the influence of the uncertainty measurement of the relevant parameters to the rehearsal of Vickers hardness.

Keywords. Vickers hardness, uncertainty, hardness