



## EXPRESSÃO DA INCERTEZA NA MEDIÇÃO DA DUREZA BRINELL

**Sueli Fischer Beckert**

Instituto Superior de Tecnologia – IST, Centro de Mecânica de Precisão de Joinville – CMPJ  
[sueli@sociesc.com.br](mailto:sueli@sociesc.com.br) – Joinville, SC, Brasil

**Luciana Stuewe**

Instituto Superior de Tecnologia – IST, Centro de Tecnologia em Materiais – CTMa  
[Stuewe@sociesc.com.br](mailto:Stuewe@sociesc.com.br) – Joinville, SC, Brasil

**Resumo.** *A dureza Brinell é uma medida feita nos metais que estabelece sua resistência a deformação plástica ou permanente.*

*O resultado de medição desta grandeza deve ser composta do valor mais provável, associada da incerteza de medição.*

*O artigo apresenta como expressar a incerteza na medição da dureza Brinell, pelo método direto, considerando as principais fontes de incerteza que podem afetar o resultado da medição.*

**Palavras-chave:** dureza, incerteza de medição, brinell

### 1. INTRODUÇÃO

A dureza é uma propriedade mecânica avaliada nos metais, sendo uma medida da resistência a deformação plástica ou permanente. Mas dependendo da experiência de quem interpreta, a dureza pode ter diversos significados. SOUZA (1974) relaciona alguns exemplos: “para um metalurgista, dureza significa a resistência à deformação plástica permanente; um engenheiro mecânico define a dureza como a resistência à penetração de um material duro no outro; para um projetista, a dureza é considerada uma base de medida para o conhecimento da resistência e do tratamento térmico ou mecânico de um metal e da sua resistência ao desgaste; para um técnico em usinagem de metais, a dureza fornece uma medida de resistência ao corte do metal”.

Para medir a dureza em metais, um dos métodos largamente aplicado, foi apresentado por J. A. Brinell em 1900. Mesmo sendo um método antigo, raramente são encontrados nos registros ou relatórios de medição, a expressão da incerteza de medição em seus resultados.

Conforme a norma ISO/IEC 17025 (1999), que aponta os requisitos gerais para a avaliação da competência de laboratórios de ensaios (e de calibração), estes “devem ter e aplicar procedimentos para estimar a incerteza de medição”. Esta exigência é endossada na norma Mercosul NM 187-1:99 (CMN, 1999), ao estabelecer que nos relatórios de ensaio, entre outras informações, os resultados de dureza obtidos devem ser apresentados com as respectivas incertezas de medição.

Para calcular a incerteza de medição é utilizado internacionalmente a metodologia apresentada no Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (BIPM, 1993), sendo que este artigo tem por finalidade apresentar a aplicação desta metodologia na determinação da incerteza na medição da dureza Brinell pelo método direto.

Na seqüência será apresentado resumidamente o método para determinação da dureza Brinell e os passos a serem observados no cálculo da incerteza de medição.

## 2. PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO DA DUREZA BRINELL

SOUZA (1974) resume que “o ensaio de dureza Brinell em materiais metálicos consiste em comprimir lentamente uma esfera de aço (ou de metal duro), de diâmetro  $D$ , sobre a superfície plana, lisa e limpa de um metal, através de uma carga  $F$ , durante um tempo  $t$  (Fig. 1).

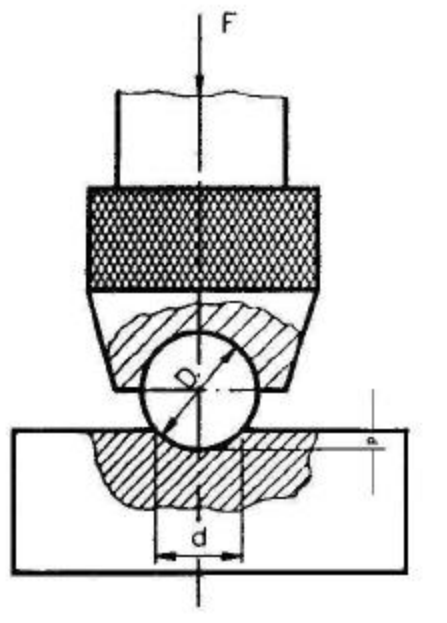


Figura 1 – Impressão da calota, após aplicação da carga

Essa compressão provocará um impressão permanente no metal com o formato de uma calota, tendo esta um diâmetro  $d$ , o qual é medido por meio de um microscópio ou lupa graduados, depois de removida a carga.”

Para realização do ensaio, a norma Mercosul NM187-1:99 (CMN, 1999) relaciona diversos aspectos a serem observados na preparação do corpo de prova e durante a medição, entre os quais podem ser citados: espessura do corpo de prova, distância mínima entre as impressões e em relação às bordas do corpo de prova, a relação entre esfera e força a serem utilizadas. Para fins de avaliação dos resultados, é importante apontar que as medições realizadas sob temperatura controlada, devem ser feitas a  $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , o tempo de aplicação de força deve se manter entre 10 s e 15 s, e o diâmetro de cada impressão deve ser medido em duas direções perpendiculares, sendo feita a média aritmética destas para calcular o valor da dureza Brinell.

### 2.1 Cálculo da dureza Brinell

Conforme a norma NM187-1:99 (CMN, 1999), a dureza Brinell é definida como o quociente entre a força aplicada pela área da superfície de impressão- Eq. (1):

$$\text{Dureza Brinell} = \frac{F}{Dh} \quad \begin{array}{l} F = \text{Força aplicada} \\ D = \text{diâmetro da esfera} \\ h = \text{profundidade de impressão} \end{array} \quad \text{Eq. (1)}$$

Através da Figura 1, deduz-se a profundidade h em função do diâmetro da esfera D e do diâmetro da calota d, conforme pode ser observado na Eq. (2):

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \quad \text{Eq. (2)}$$

Substituindo a profundidade h na Eq. (1) e transformando a força aplicada de kgf para Newton, a Dureza Brinell é obtida a partir da Eq. (3):

$$\text{Dureza Brinell} = 0,064935 \frac{F}{D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad \begin{array}{l} F: \text{Newton (N)} \\ D, d: \text{mm} \end{array} \quad \text{Eq. (3)}$$

A dureza Brinell tem como notação os seguintes símbolos:

- HBS nos casos em que a esfera utilizada é de aço;
- HBW nos casos de utilização de esfera de metal duro.

Os símbolos HBS ou HBW são precedidos do valor da dureza e seguidos por um índice que indica as condições de medição, na seguinte ordem:

- Diâmetro da esfera, em mm;
- Um número representando a força de medição;
- Duração da aplicação da força, em s, quando diferente do tempo especificado em norma.

### 3. CÁLCULO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

A metodologia apresentada no Guia para Expressão da Incerteza de Medição (BIPM,1993) faz uso de recursos estatísticos para a avaliação da incerteza de medição e na seqüência será apresentado como utilizá-la na obtenção dos resultados de medição da dureza Brinell.

A Tabela 1 é um modelo a ser utilizado nos cálculos, por facilitar a organização das informações, permitindo registrar os dados para obtenção da medida propriamente dita, como também da incerteza de medição.

Tabela 1 - Grid para cálculo da incerteza de medição

A	B	C	D	E	F	G
Grandeza $X_i$	Estimativa $x_i$	Incerteza padrão $u(x_i)$	Distribuição de probabilidade	Coefficiente de sensibilidade $c_i$	Contribuição para incerteza padrão $u_i(y)$	Graus de liberdade $\nu_i/\nu_{\text{eff}}$
Y	Incerteza padrão $u(y)$					
	Incerteza expandida U					k =

Para obter o resultado de medição da dureza Brinell, um modelo matemático deve ser elaborado considerando todas as grandezas de entrada  $X_i$  das quais o resultado final  $Y$  depende (Eq. 4):

$$Y = 0,064935 \frac{F}{D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad Y = \text{dureza Brinell} \quad \text{Eq. (4)}$$

Conhecendo-se modelo matemático e realizado o ensaio, a Tabela 1 é preenchida para a obtenção dos resultados.

### 3.1 Conteúdo das colunas da Tabela 1

Na seqüência estão detalhados os conteúdos a serem preenchidos na planilha:

- Coluna A: Devem ser relacionadas as grandezas de entrada  $X_i$ , ou sejam  $F$ (força aplicada),  $D$  (diâmetro da esfera),  $d$  (diâmetro da calota).
- Coluna B: Para cada grandeza de entrada  $X_i$  apresentada na coluna A, deve ser estimado o valor mais provável a ser atribuída a grandeza. As medidas da força aplicada e do diâmetro da esfera podem ser obtidos do certificado de calibração. A medida da calota é obtida da média das medições realizados sobre o metal. A estimativa de saída  $y$  é obtida através da aplicação da Eq. (4), substituindo na mesma as estimativas de entrada  $x_i$ .
- Coluna C: O desvio-padrão de cada estimativa de entrada  $x_i$  deve ser registrado, sendo o mesmo denominado incerteza padrão  $u(x_i)$ . A incerteza padrão da força e da esfera são calculadas conforme Eq. (5), sendo que a incerteza de medição da grandeza e o valor de  $k$ , são obtidos do certificado de calibração.

$$u(x_i) = \frac{U}{k} \quad \begin{array}{l} U = \text{incerteza de medição da grandeza} \\ k = \text{fator de abrangência} \end{array} \quad \text{Eq. (5)}$$

A incerteza padrão da calota é estimada previamente na mesma metodologia que está sendo apresentada aqui para medição de dureza

- Coluna D: Para cada grandeza de entrada deve-se definir a distribuição de probabilidade que estão sujeitas. Para a força aplicada e para o diâmetro da esfera, o tipo de distribuição é obtido do certificado de calibração. Para o diâmetro da calota, é atribuída uma distribuição normal, visto que as componentes que influenciam o resultado de medição possuem distribuição normal e retangular.
- Coluna E: Os coeficientes de sensibilidade descrevem como a estimativa de saída  $y$  (dureza) varia com as alterações nos valores das estimativas de entrada  $x_i$ , ou seja, é a derivada parcial da função  $f$  em relação a variável  $X_i$ , avaliada através das estimativas de entrada  $x_i$  – Eq. (6):

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad \text{Eq. (6)}$$

A partir da Eq. (6), são determinados os coeficientes de sensibilidade para força, esfera e calota – Eq (7) a Eq. (9), respectivamente:

$$c_{\text{força}} = \frac{0,064935}{D^2 - \sqrt{D^4 - D^2 d^2}} \quad \text{Eq.(7)}$$

$$c_D = \frac{-0,064935F \left[ 2D - \frac{(4D^3 - 2Dd^2)}{2\sqrt{D^4 - D^2 d^2}} \right]}{\left[ D^2 - \sqrt{D^4 - D^2 d^2} \right]^2} \quad \text{Eq.(8)}$$

$$c_d = \frac{-0,064935F \left[ \frac{(D^2 d)}{\sqrt{D^4 - D^2 d^2}} \right]}{\left[ D^2 - \sqrt{D^4 - D^2 d^2} \right]^2} \quad \text{Eq. (9)}$$

Coluna F A contribuição de cada componentes para a incerteza padrão de saída  $u(y)$  é calculada através da multiplicação da incerteza padrão da grandeza de entrada  $u(x_i)$  pelo seu respectivo coeficiente de sensibilidade – Eq. (10).

$$u_i(y) = c_i * u(x_i) \quad \text{Eq. (10)}$$

A incerteza padrão de saída  $u(y)$  é obtida através da soma quadrática das contribuições  $u_i(y)$  – Eq. (11)

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y)} \quad \text{Eq. (11)}$$

Coluna G Os graus de liberdade relativos a cada componente de incerteza dependem do tipo de distribuição que a mesma está sujeita.

No caso da força aplicada e da esfera, o graus de liberdade ( $\mathbf{u}_i$ ) são obtidos através do certificado de calibração. De acordo com o valor de  $k$ , deve-se consultar a Tabela 2, para selecionar o respectivo valor de  $\mathbf{u}_i$ .

Ao diâmetro da calota são atribuídos os graus de liberdade obtidos na medição do referido diâmetro.

Para determinar o número de graus de liberdade efetivos para a incerteza padrão  $u(y)$ , é utilizada a Eq. (12):

$$v_{\text{eff}} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(y)}{\mathbf{u}_i}} \quad \text{Eq. (12)}$$

Tabela 2 - Determinação de  $k$  e  $v_i/v_{\text{eff}}$

$n_i/n_{\text{eff}}$	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
<b>k</b>	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2

Para obter a incerteza expandida  $U$  que fornece um intervalo de confiança de 95,4%, deve-se multiplicar a incerteza padrão  $u(y)$  pelo fator de abrangência  $k$  – Eq. (13).

$$U = k * u(y) \quad \text{Eq. (13)}$$

O valor de  $k$  é obtido da Tabela 2, selecionando este através da relação com os graus de liberdade  $v_{\text{eff}}$  obtidos através da Eq. 12. Se  $v_{\text{eff}}$  não for inteiro, o que é usualmente o caso, o valor de  $v_{\text{eff}}$  é truncado para o próximo menor inteiro. Se  $v_{\text{eff}}$  for maior que 50, o valor de  $k$  é igual a 2.

#### 4. APLICAÇÃO

Buscando exemplificar o exposto no capítulo anterior, realizou-se um ensaio para medição da dureza Brinell em um material metálico, tendo sido feitas 5 impressões sobre o corpo de prova.

Para a realização do ensaio foi utilizada uma carga de  $2992 \text{ kg} \pm 13 \text{ kg}$   $k = 2$  (nível de confiança de 95,4%) e uma esfera de diâmetro da esfera:  $9,998 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$   $k = 2$  (nível de confiança de 95,4%). As impressões das calotas foram medidas em um microscópio de medição que possui uma incerteza de medição de  $\pm 0,004 \text{ mm}$   $k = 2$  (nível de confiança de 95,4%), sendo obtidas as medidas apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Medidas das calotas (em mm)

4,181	4,198	4,268	4,244	4,186
4,145	4,161	4,223	4,277	4,155

Para determinação da incerteza na medição da dureza, é necessário inicialmente determinar o diâmetro médio das calotas com a respectiva incerteza de medição. O diâmetro da calota é definido através da Eq. (14):

$$Y = \bar{x} + C + D \quad \text{Eq. (14)}$$

$\bar{x}$  = média das medidas obtidas  
 $C$  = correção do erro sistemático do microscópio  
 $D$  = Correção de influências diversas que podem afetar o resultado da medição, provenientes de vibrações, erro de forma, tempo de impressão, entre outras.

A Tabela 4 apresenta a formatação das informações para a obtenção da incerteza de medição do diâmetro da calota.

Tabela 4 - Determinação do diâmetro da calota

A	B	C	D	E	F	G
Grandeza $X_i$	Estimativa $x_i$	Incerteza padrão $u(x_i)$	Distribuição de probabilidade	Coefficiente de sensibilidade $c_i$	Contribuição para incerteza padrão $u_i(y)$	Graus de liberdade $\nu_i/\nu_{eff}$
Média (mm)	4,2038	$0,0470/\sqrt{10} = 0,0149$	Normal	1	0,0149	9
Microscópio (mm)	0	$0,004/2 = 0,002$	Normal	1	0,002	$\infty$
Diversos (mm)	0	$0,043/\sqrt{3} = 0,0248$	Retangular	1	0,0248	$\infty$
Y (mm)	4,204	Incerteza padrão $u(y)$			0,029	> 50
		Incerteza expandida U (mm)			0,058	k = 2

Determinado o diâmetro da calota, a Tabela 5 é complementada para obtenção do resultado da medição da dureza, cuja função para determinação da medida está especificada na Eq. (4).

Tabela 5 - Exemplo de aplicação de dureza Brinell

A	B	C	D	E	F	G
Grandeza $X_i$	Estimativa $x_i$	Incerteza padrão $u(x_i)$	Distribuição de probabilidade	Coefficiente de sensibilidade $c_i$	Contribuição para incerteza padrão $u_i(y)$	Graus de liberdade $\nu_i/\nu_{eff}$
Esfera (mm)	9,998	$0,002/2 = 0,001$	Normal	2,1001	0,0021	$\infty$
Força (N)	29341,613	$127,487/2 = 63,7435$	Normal	0,0070	0,4462	$\infty$
Calota (mm)	4,204	$0,058/2 = 0,029$	Normal	-102,7755	2,9805	$\infty$
Y (HBS)	206	Incerteza padrão $u(y)$			3,014	> 50
		Incerteza expandida U (HBS)			6	k = 2

## 5. CONCLUSÕES

A dureza Brinell vem sendo medida a várias décadas mas na maioria dos resultados não é expresso o quanto o valor obtido está sujeito a variações. A utilização de uma metodologia que expresse também a incerteza de medição permite ao usuário uma análise mais coerente sobre os resultados obtidos. O acabamento inadequado da superfície ou a seleção incorreta da esfera de medição podem inviabilizar os resultados, devido às incertezas de medição elevadas.

Este trabalho uniu o princípio de medição adotado para determinação da dureza Brinell (norma NM 187-1:99) com a metodologia para expressão da incerteza de medição reconhecida internacionalmente (Guia para expressão da Incerteza de medição do BIPM).

Através da metodologia aplicada, pode-se concluir que a incerteza na medição na dureza Brinell, medida pelo método direto, tem como principal fonte de incerteza o diâmetro da calota. A variação em centésimos de mm nesta medida faz que as medições da dureza tenham seus valores alterados em algumas unidades. Neste sentido, recomenda-se que as medições sejam feitas em superfícies de bom acabamento, para que seja melhor visualizado o contorno

da calota e assim minimizado o erro de forma e de leitura. A utilização de medidores ópticos com melhores resoluções e menores incertezas também contribuem para a obtenção de uma menor incerteza na medição da dureza Brinell.

A opção em selecionar a esfera de 10 mm na medição é recomendada, devido ao fato da mesma ter menor influência sobre a incerteza final, quando comparado com as esferas de 5mm e 2,5 mm.

Este artigo teve como finalidade mostrar a aplicabilidade do cálculo de incerteza na medição da dureza, mas também pode-se demonstrar que esta metodologia pode ser expandida para outras grandezas da área de ensaios mecânicos, desde que conhecidas e definidas as componentes de incerteza que influenciam no processo de ensaio.

## REFERÊNCIAS

- 1 DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica. Rio de Janeiro:** Guanabara Koogan, 1981. Título original: Mechanical Metallurgy, McGraw Hill, 1976.
- 2 CMN. **Norma Mercosur NM 187-1:99 Materiais metálicos – Dureza Brinell – Parte 1: Medição da dureza Brinell.** Rio de Janeiro, ABNT, 1999.
- 3 SOUZA, A.S. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos.** 3ª Edição. São Paulo: Edgard Blücher, USP, 1974.
- 4 ISO/IEC. **Norma ISO/IEC 17025; General Requirements for the competence of testing and calibration laboratories.** Suíça: ISSO, 1999
- 5 BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML. **Guia para Expressão da Incerteza de Medição.** 2ª Edição. Rio de Janeiro: ABNT, INMETRO, SBM, 1998. Título original: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. 1993.

## EXPRESSION OF UNCERTAINTY OF MEASUREMENT IN BRINELL HARDNESS

*Abstract.* This article presents how the uncertainty in the measurement of the hardness Brinell affects the result of the measurement by a direct method. The Brinell hardness is measured in metals, which establishes the resistance to plastic or permanent deformation. The result of this measurement is defined by of the most probable value and it is associated to measurement uncertainty.

**Keywords:** Brinell, hardness, uncertainty of measurement