

*Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
Diretoria de Metrologia Científica e Industrial - Dimci
Divisão de Metrologia Mecânica - Dimec*

GUIA PARA A ESTIMATIVA DA INCERTEZA EM MEDIÇÕES DE DUREZA

**DIMEC/gc-04/v.00
Tradução do documento EURAMET/cg-16/v.01**

Guia de Calibração

Setembro 2008.



Informação

Esta publicação é uma tradução do Guia de Calibração EURAMET “Guia para a Estimativa da Incerteza em Medições de Dureza” (EURAMET/cg-16/v.01, July 2007). Os direitos autorais do documento original pertencem à EURAMET e.V. 2007. O guia de calibração não pode ser copiado para a revenda e não pode ser reproduzido a não ser na sua totalidade. Em nenhuma circunstância a EURAMET, os autores ou qualquer outra pessoa envolvida na criação do documento poderá ser responsabilizada por quaisquer danos decorrentes do uso das informações aqui contidas."

Nota: Tradução feita por Cláudio Afonso Kock e Sérgio Pinheiro de Oliveira.

Conteúdo

1	Introdução -----	1
2	Parâmetros que afetam a incerteza de medição de dureza por penetração -----	4
2.1	Material de referência/ensaio -----	5
2.2	Máquina de dureza -----	7
2.3	Condições ambientais -----	8
2.4	Operador -----	8
3	Procedimento geral para calcular a incerteza da medição de dureza -----	8
4	Aplicação para a escala rockwell c: estimativa e propagação de incerteza -----	11
4.1	Incerteza de calibração de máquinas de ensaio de dureza (método de calibração direta) -----	11
4.2	Incerteza de calibração do método de calibração indireto -----	15
5	Referências -----	22

Guia para a Estimativa da Incerteza em Medições de Dureza

1 Introdução

- 1.1 No campo da medição de dureza uma ampla variedade de métodos e equipamentos são empregados, os quais podem diferir de acordo com o material. Uma medição de dureza é útil quando os resultados obtidos em locais diferentes são compatíveis dentro de um intervalo determinado de incerteza de medição. O guia visa demonstrar os conceitos de incerteza de medição aplicados neste campo específico. Somente as incertezas comumente usadas para métodos de medição de dureza por penetração para metais (Brinell, Rockwell, Vickers) são discutidas, para as faixas empregadas geralmente na prática da engenharia, e onde os métodos metrológicos universais já foram implementados nos países industrializados.
- 1.2 Um valor de dureza é o resultado de uma medição realizada em um corpo-de-prova sob condições padrão, sendo baseado em uma convenção acordada. A determinação da dureza é realizada essencialmente em duas etapas:
1. Uma impressão é realizada sob condições prescritas,
 2. A determinação de uma dimensão característica da impressão (diâmetro médio, diagonal média ou profundidade de penetração).
- 1.3 A disseminação das escalas de dureza é baseada em três elementos principais:
- a) **a definição da escala de dureza:** descrição do método de medição, as tolerâncias relevantes das grandezas envolvidas e as condições ambientais limitantes.
 - b) **a máquina de referência de dureza:** dispositivos metrológicos que materializam as definições da escala de dureza. Devem ser feitas distinções entre *máquinas de padronização primária*, que constituem a melhor realização possível das definições da escala de dureza, e *máquinas de calibração*, usadas para a produção industrial de blocos de referência de dureza.
 - c) **o bloco de referência de dureza:** pode-se distinguir entre *blocos de referência primária de dureza*, calibrados por máquinas de padronização primária de dureza e utilizados quando é requerida a mais alta exatidão, ou seja, para verificação e calibração de máquinas de calibração de dureza, e *blocos de referência de dureza* planejados principalmente para a verificação e calibração de máquinas de ensaio de dureza industriais.

1.4 A figura 1.1 mostra a estrutura em quatro níveis da cadeia metrológica necessária para definir e disseminar as escalas de dureza. Nota-se que em cada nível são requeridas tanto a calibração direta quanto a indireta. A calibração direta fornece toda a referência possível aos padrões nacionais de massa, comprimento e tempo, e checka a conformidade às tolerâncias requeridas pela definição da escala. A calibração indireta é requerida porque vários fatores, ainda não completamente definidos (ou seja, o padrão deslocamento-tempo durante a penetração, irregularidades de forma e desempenho mecânico do penetrador) não podem ser avaliados por medição direta. Entretanto, comparações como as comparações internacionais para Máquinas de Padronização Primária de Dureza, comparações com Blocos de Referência Primária de Dureza para as Máquinas de Calibração de Dureza, e finalmente as comparações com Blocos de Referência de Dureza para Máquinas de Calibração de Dureza, são consideradas como medições indiretas. Como mostrado antes, a calibração direta e a calibração indireta cobrem contribuições diferentes para a incerteza, de modo que podem ser obtidas, com significado diferente, expressões diferentes da incerteza:

- a) incerteza da definição da escala, produzida pelas tolerâncias adotadas e pela falta de definição de alguns fatores de influência;
- b) incerteza da materialização nominal da definição da escala, produzida pela incerteza dos fatores definidos pelas definições da escala (levados em conta pela calibração direta);
- c) incerteza da materialização efetiva da definição da escala, produzido pelos fatores não definidos pelas definições da escala (levados em conta pela calibração indireta)

Atenção que a contribuição a) é inerente à definição em si e portanto deve sempre ser combinada com as contribuições b) e c) que estão, pelo menos parcialmente, sobrepondo-se, de modo que se possa tomar o valor máximo das duas avaliações separadas.

1.5 A cadeia metrológica começa no nível internacional usando definições internacionais das várias escalas de dureza para realizar intercomparações internacionais.

1.6 Várias *máquinas de padronização primária de dureza* no **nível nacional** “produzem” *blocos de referência primária de dureza* para a o nível de laboratório de calibração. Naturalmente, convém que a calibração direta e a verificação destas máquinas tenham a mais alta exatidão possível.

1.7 Nenhuma norma internacional está disponível para a primeira etapa na materialização das escalas de dureza. Devido ao pequeno número de laboratórios no nível nacional, o seu trabalho é regulado por procedimentos de operação internos para máquinas primárias somente e, naturalmente, pelos regulamentos para *intercomparações internacionais*.

- 1.8 No **nível de laboratório de calibração**, os *blocos de referência primária de dureza* são utilizados para qualificar as máquinas de calibração de dureza, que também têm que ser calibradas diretamente e indiretamente. Estas máquinas são então usadas para calibrar os *blocos de referência de dureza* para o nível de usuário.
- 1.9 No **nível de usuário**, os *blocos de referência de dureza* são usados para calibrar as máquinas de ensaio de dureza industriais de uma maneira indireta, depois de terem sido calibradas diretamente.
- 1.10 A estabilidade das escalas de dureza é essencialmente fundamentada por este procedimento de calibração para máquinas de dureza em duas etapas:
- I) a calibração direta assegura que a máquina está funcionando corretamente de acordo com as definições de dureza e com respeito aos parâmetros apropriados;
 - II) a calibração indireta com os blocos de referência de dureza engloba o desempenho da máquina como um todo.
- 1.11 Os principais requisitos para os blocos de referência de dureza são a estabilidade com tempo e a uniformidade na superfície do bloco.
- 1.12 Em alguns casos os blocos de dureza calibrados pelas máquinas de padronização primária são utilizados diretamente para a verificação e a calibração de máquinas de ensaio de dureza industriais. Isto não está de acordo com a estrutura em quatro níveis da figura 1.1, mas existem boas razões para isto. Na metrologia de dureza, a clássica regra prática – isto é, convém que o instrumento de referência seja uma ordem de magnitude, ou pelo menos por um fator de três, melhor que o dispositivo controlado – não pode ser aplicada em muitos casos.
- O intervalo de incerteza entre o nível nacional e o nível de usuário é geralmente pequeno e cada etapa desde o primeiro nível até o próximo adiciona uma contribuição adicional à incerteza total; logo, a hierarquia em quatro níveis pode levar a incertezas muito grandes para valores de dureza confiáveis no nível do usuário. A maior parte dos problemas metrológicos da comparação de dureza, da propagação de erro e da rastreabilidade a padrões tem sua origem neste fato. Os cálculos na seção 4 ilustram este problema.

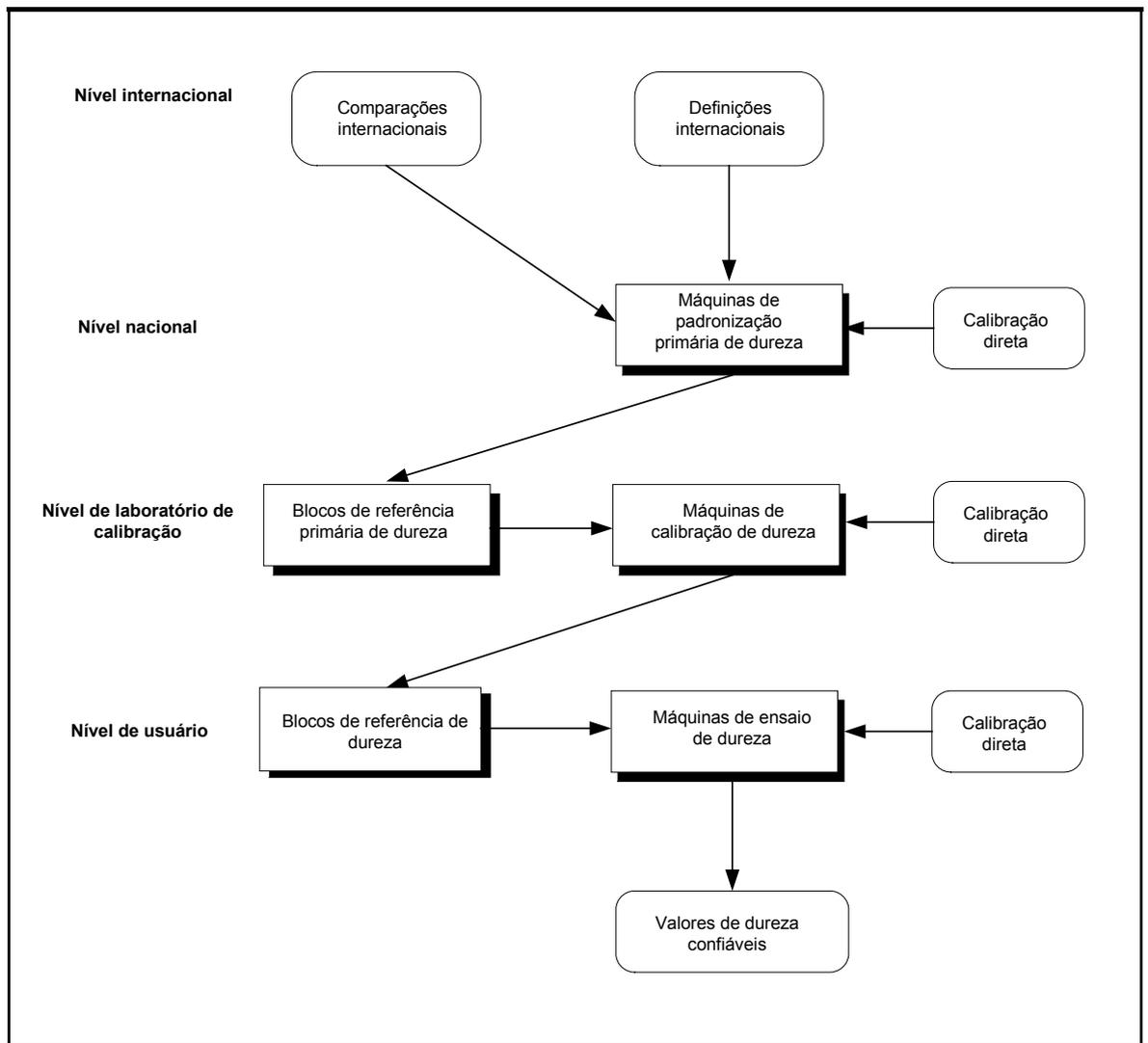


Fig. 1.1: A estrutura da cadeia metrológica para a definição e disseminação das escalas de dureza.

2 Parâmetros que afetam a incerteza de medição de dureza por penetração

2.0.1 A medição de dureza por penetração pode com frequência ser considerada como realmente não-destrutiva, visto que a parte ensaiada continua utilizável depois. Entretanto, a destruição no ponto real do ensaio torna impossível a verificação da incerteza do processo por uma medição repetida no mesmo ponto. Logo, é importante que cada medição simples seja realizada com um alto grau de exatidão (ver seção 2.4).

2.0.2 Há vários parâmetros de influência que afetam a incerteza da medição de dureza mais ou menos seriamente; eles estão listados na tabela 2.1 e divididos em grupos de acordo com as suas origens:

1. Corpo-de-prova
2. Máquina de ensaio de dureza
3. Condições ambientais
4. Operador

2.0.3 A tabela lista mais de 20 fontes de incerteza que podem contribuir significativamente para a incerteza total de uma medição de dureza. Estas fontes de incerteza nem sempre podem contribuir para cada medição em cada nível da cadeia metrológica ilustrada na figura 1.1.

2.1 Material de referência / ensaio

2.1.1 A tabela 2.1 mostra que o material do corpo-de-prova introduz várias incertezas significativas. Por exemplo, a *espessura do corpo-de-prova* pode afetar a dureza medida se for selecionado o método errado. Quanto mais profunda for a impressão, mais espesso precisa ser o corpo-de-prova. O Material que é muito fino resultará mais duro por causa do efeito de bigorna. Além disso, se o material for muito fino para suportar a força de ensaio durante a medição, o próprio penetrador poderia ser danificado e isto arruinaria a confiabilidade de qualquer outra medição realizada com este penetrador.

2.1.2 A *qualidade superficial do corpo-de-prova* pode também influenciar consideravelmente os resultados da medição de dureza. Um superfície mais áspera requereria uma força maior e/ou um penetrador maior para produzir uma impressão mais larga. O método Brinell pode ser o mais apropriado, visto que é menos afetado por uma superfície áspera que o Rockwell ou o Vickers. Embora as medições Brinell sejam mais tolerantes às variações de acabamento, há limites para a rugosidade superficial admissível por este método também. Em geral, a uniformidade do acabamento superficial é importante para resultados exatos e reprodutíveis.

2.1.3 A *limpeza superficial* é também crítica para uma medição de dureza precisa e reprodutível. Sujeta na superfície como graxa, óxidos ou poeira podem causar desvios consideráveis nos resultados; além do mais, o material de ensaio ou bloco de referência pode até ser danificado irreversivelmente.

Tabela 2.1: Parâmetros que afetam a incerteza da medição de dureza por penetração

Fator de influência	Fonte de incerteza	Referências	Parâmetros considerados para cálculo	
1. Corpo-de-prova	Espessura do corpo-de-prova muito pequena			
	Rigidez do suporte			
	Estrutura do grão muito grossa	Relevante somente se o método de ensaio escolhido não for apropriado		
	Rugosidade superficial			
	Distribuição não homogênea da dureza			
	Limpeza superficial			
2. Máquina de ensaio de dureza				
a) Estrutura da máquina	Perda por atrito			
	Deflexão elástica			
	Desalinhamento do porta-penetrador			
b1) Sistema de medição da profundidade	Erro de indicação	Relevante somente para Rockwell	profundidade de penetração	h
	Baixa resolução			
	Não linearidade			
	Histerese			
b2) Sistema de medição lateral	Erro de indicação	Relevante somente para Brinell, Vickers e Knoop		
	Baixa resolução			
	Abertura numérica das lentes ou do iluminador			
	Iluminação não homogênea da impressão			
c) Sistema de aplicação de força	Desvio das forças nominais		força de ensaio inicial/total	F_0, F
	Desvio do ciclo de ensaio em relação aos intervalos de tempo		tempo de manutenção da força de ensaio inicial/total	t_0, t
	Introdução da força			
	Aplicação extra de forças de ensaio		velocidade de penetração	v
	d) Penetradores	Desvio da forma ideal		raio e ângulo do penetrador
Dano				
3. Condições ambientais	Desvio de temperatura ou deriva			
	Vibração e choques			
4. Operador	Seleção errada do método de ensaio			
	Manuseio, leitura, erros de estimativa			

2.2 Máquina de dureza

- 2.2.1 O projeto, a montagem e as condições da máquina de ensaio de dureza são todos críticos para resultados exatos. Atrito excessivo pode causar tendência e não-repetitividade. Mesmo instrumentos que são operados apropriadamente podem fornecer resultados ruins devido a atrito excessivo no sistema de aplicação de força. Contribuições para a incerteza similares devido a pequenas quantidades de atrito podem ser esperadas do sistema de medição de profundidade.
- 2.2.2 Deflexões excessivas do quadro de suporte da máquina de ensaio e do sistema de apoio do corpo-de-prova podem causar problemas também. Desvios de 1 a 3 unidades de dureza não são incomuns devido a apoio impróprio do corpo-de-prova e deflexão excessiva do quadro do instrumento.
- 2.2.3 Devido às dimensões muito pequenas que são medidas, o sistema de medição é crítico. Por exemplo, uma unidade regular da escala Rockwell é equivalente a apenas 2 μm de profundidade de penetração e a escala superficial é metade disso, logo, a incerteza do sistema de medição é muito importante.
- 2.2.4 O sistema de aplicação de força deve aplicar constantemente forças exatas. Equipamentos de medição de alta qualidade devem ser capazes de aplicar forças dentro dos limites de $\pm 1,0\%$ para o nível de usuário, e até dentro de 0,1% da força nominal para máquinas de calibração.
- 2.2.5 A aplicação das forças requer que a velocidade e o tempo de manutenção das forças sejam definidos. As variações dos parâmetros do ciclo de ensaio que podem ocorrer com algumas máquinas controladas manualmente podem produzir variações no resultado de até 1 HRC em 60 HRC. Materiais mais macios e materiais sujeitos ao encruamento poderiam fornecer incertezas significativamente maiores. Nestes casos, as contribuições da incerteza de manutenção do tempo e da velocidade de penetração devem ser avaliadas especialmente para o material ensaiado.
- 2.2.6 As propriedades do penetrador também influenciam a incerteza das medições de dureza. É relativamente fácil fabricar uma esfera com a forma requerida. Contudo, o porta-esfera é a principal fonte de incerteza.
- 2.2.7 Penetradores de diamante são mais difíceis de fabricar na forma requerida. As fontes potenciais da incerteza são significativas, mas neste contexto não é necessário categorizar o efeito de cada uma em detalhe. É importante notar aqui que os melhores penetradores de diamante Rockwell fabricados hoje exibirão variações de até ± 0.5 HRC quando comparados na mesma

máquina de ensaio. Penetradores de baixa qualidade fornecerão variações significativamente maiores.

2.3 Condições ambientais

2.3.1 A temperatura ambiente deve ter influência considerável nos resultados das medições de dureza, especialmente se pequenos comprimentos tiverem que ser determinados. O limite inferior para impressões Vickers é 20 µm, e a profundidade mínima para as escalas Rockwell N e T é de somente 6 µm a 7 µm. De acordo com as normas apropriadas, as faixas de temperatura são de 10°C a 35°C para os métodos de ensaio e de (23±5)°C para a calibração de blocos de referência. Estas faixas são muito largas para algumas escalas de dureza, mas a operação fora destas faixas deve em qualquer caso ser motivo de preocupação. Se isto for inevitável, convém que sejam realizadas medições comparativas para avaliar a influência da temperatura.

2.3.2 *Vibrações, interferência elétrica e falta de limpeza* podem causar problemas significativos que são difíceis de quantificar. Obviamente, medições de microdureza com forças muito baixas requerem um ambiente absolutamente livre de vibrações, ao passo que os requisitos de vibração para forças de ensaio acima de 200 mN não são tão críticas.

2.4 Operador

As posições de medição na superfície da amostra tornam-se importantes em muitos casos. Medições, por exemplo, próximas da borda de uma peça ou em pontos próximos entre si devem ser localizados apropriadamente para assegurar resultados exatos. Incertezas de até 2 HRC não são incomuns aqui. Toda a monitoração da operação é muito importante. Algumas máquinas de ensaio modernas têm características que minimizam a influência do operador; entretanto, o último ainda é essencial para uma medição de dureza bem sucedida.

3 **Procedimento geral para calcular a incerteza da medição de dureza**

O procedimento seguinte é baseado na EA/4-02 [1] (cf. exemplos mostrados na seção 4).

a) Expresse a relação entre a dureza medida H (grandeza de saída) e as grandezas de entrada X_i (função de modelo) nos termos matemáticos:

$$H = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1)$$

Note-se que no caso da Dureza não é conhecida, no estado da arte, uma relação matemática que conecte as grandezas de entrada X_i com a grandeza de saída H . A conexão é fornecida pelas definições da escala que são procedimentos empíricos. Entretanto, a função de modelo não fornece muito mais que uma lista de fatores que afetam os resultados de medição. Na prática isto é suficiente para estabelecer um procedimento baseado na EA/4-02, contanto que seja adotado cuidado especial para estimar as incertezas-padrão das grandezas de entrada e os coeficientes de sensibilidade, com mostrado a seguir.

- b) Identifique e aplique todas as correções significativas;
- c) Liste todas as fontes de incerteza na forma de uma análise de incerteza de acordo com a tabela seguinte:

Tabela 3.1: Esquema de um arranjo ordenado das grandezas, estimativas, incertezas padrão, coeficientes de sensibilidade e contribuições de incerteza usadas nas análises de incerteza de uma medição de dureza

grandezas X_i	estimativa x_i	incerteza padrão $u(x_i)$	coeficiente de sensibilidade c_i	contribuição para a incerteza padrão $u_i(H)$
X_1	x_1	$u(x_1)$	c_1	$u_1(H)$
...
X_n	x_n	$u(x_n)$	c_n	$u_n(H)$
Dureza	H			$u(H)$

As grandezas na tabela 3.1 são definidas como segue:

- X_i grandezas, relatadas na tabela 2.1, que afetam o resultado de medição H . Como mencionado em 1.4, a incerteza pode ser estimada através de dois modos separados: o primeiro modo envolvendo as grandezas físicas usadas para as definições de escala (forças, comprimentos, tempos, velocidades, etc.), refere-se à calibração direta; o segundo modo, envolvendo todos os fatores de influência presentes na prática, refere-se à calibração indireta. Note-se que se poderia supor que este segundo modo contém todas as contribuições à incerteza, logo pode fornecer sozinho o valor de incerteza requerido, mas isto nem sempre é verdade.
- x_i valores estimados das grandezas X_i .
- $u(x_i)$ incertezas-padrão das estimativas x_i . Podem ser seguidos alguns caminhos para a determinação de $u(x_i)$. Para a parte conectada com a incerteza das definições da escala de dureza, estas devem usar os campos de tolerância da

definição [3] como campos de variabilidade, e estimar as contribuições da incerteza do tipo B. As incertezas do tipo B devem ser utilizadas em qualquer caso quando está disponível apenas uma declaração de conformidade. Para a parte conectada com a calibração direta, é possível determinar $u(x_i)$ através da incerteza declarada nos certificados de calibração dos instrumentos de medição usados nas medições diretas. Para a parte conectada com a calibração indireta, isto é, realização de comparações utilizando blocos de dureza, a importante incerteza do tipo A deve ser estimada.

c_i é o coeficiente de sensibilidade associado com a estimativa de entrada x_i . O coeficiente de sensibilidade c_i descreve a extensão em que a dureza H é influenciada pelas variações da estimativa de entrada x_i . Como mencionado antes, no estado da arte a conexão matemática entre x_i e H é desconhecida, portanto os coeficientes de sensibilidade devem ser estimados experimentalmente pela mudança de ΔH na dureza H devido à mudança de Δx_i na estimativa de entrada x_i , como segue:

$$c_i \approx \frac{\Delta H}{\Delta x_i} \Bigg|_{x_1 = x_1, \dots, x_n = x_n} \quad (2)$$

A estimativa experimental dos coeficientes de sensibilidade é normalmente demorada, logo, geralmente é vantajoso utilizar os resultados experimentais dados na literatura [4,5], e adotados para os exemplos em anexo, porém, deve-se tomar cuidado quando os fatores relevantes dependem das características do material ensaiado (tempo de manutenção e velocidade de penetração). Neste caso, são necessários alguns experimentos com o material específico.

$u_i(H)$ é a contribuição para a incerteza-padrão associada padrão com a dureza H resultante da incerteza-padrão $u(x_i)$ associada com a estimativa de entrada x_i :

$$u_i(H) = c_i u(x_i) \quad (3)$$

d) Para grandezas de entrada não correlacionadas, o quadrado da incerteza-padrão $u(H)$ associada com a dureza medida H é dada por:

$$u^2(H) = \sum_{i=1}^n u_i^2(H) \quad (4)$$

e) Calcule para cada grandeza de entrada X_i a contribuição $u_i(H)$ para a incerteza associada com a dureza H resultante da estimativa de entrada x_i , de acordo com as Eqs. (2) e (3), e some os seus quadrados

conforme descrito na Eq. (4) para obter o quadrado da incerteza-padrão $u(H)$ da dureza H .

- f) Calcule a incerteza expandida U pela multiplicação da incerteza-padrão $u(H)$ associada com a dureza H por um fator de abrangência $k=2$:

$$U = ku(H) \quad (5)$$

Se o número de graus de liberdade efetivo ν_{eff} em casos excepcionais for menor que 15, então calcule o fator de abrangência k de acordo com a EA/4-02, Anexo E [1].

- g) Relate o resultado de medição como segue: em certificados de calibração, o resultado completo da medição, compreendendo a estimativa H do mesurando e a incerteza expandida associada U , deve ser fornecido na forma $(H \pm U)$. Para isso, uma nota explanatória deve ser acrescentada, a qual, no caso geral, que deve possuir o seguinte conteúdo:

A incerteza expandida de medição relatada foi obtida pela multiplicação da incerteza-padrão combinada pelo fator de abrangência $k=2$, que, para uma distribuição normal, corresponde a um nível de confiança p de aproximadamente 95%. A incerteza-padrão de medição combinada foi determinada de acordo com a EA/4-02 [1].

4 Aplicação para a escala Rockwell c: estimativa e propagação de incerteza

Os documentos padrões importantes [2] exigem que ambos os métodos de calibração direta e indireta sejam utilizados, pelo menos com máquinas de ensaio de dureza novas, reformadas ou reinstaladas. É sempre uma boa prática utilizar os dois métodos de calibração juntos.

4.1 Incerteza de calibração de máquinas de ensaio de dureza (método de calibração direta)

- 4.1.1 O método de calibração direta é baseado na medição direta dos parâmetros da escala de dureza requeridos pela ISO 6508-2 [2]. Ainda que não seja possível estabelecer uma função analítica para descrever a conexão entre os parâmetros de definição e o resultado de dureza [4], alguns experimentos [5] realmente admitem, como descrito na seção 3, a estimativa da propagação da incerteza. Porém, deve-se ter cautela na aplicação disso porque alguns parâmetros são conectados primariamente com o sistema de medição (força de ensaio inicial, força de ensaio total, profundidade de penetração, geometria do penetrador, rigidez do quadro), ao passo que outros se referem ao mensurando (efeito de fluência, efeito de encruamento).

- 4.1.2 Os parâmetros relacionados com o mensurando podem ser descritos como uma indicação baseada em resultados obtidos com blocos de referência de dureza, mas devem ser estimados diretamente para o mensurando específico. O efeito de fluência depende tanto do sistema de medição quanto das características do material; a quantidade de fluência é função das características de fluência do material, dependendo também do tempo requerido pelo sistema de medição para registrar a força. Para uma máquina com zeragem manual, a fluência geralmente pára quando o zero é finalmente alcançado. Até máquinas automáticas são mais ou menos rápidas. Uma máquina que leva 5 s para aplicar a força de ensaio inicial produz uma relaxação de fluência diferente de uma máquina que leva somente 1 s, e a observação rigorosa de um tempo de manutenção de força de 4 s não auxiliará na obtenção de resultados compatíveis.
- 4.1.3 Há necessidade de precaução na interpretação de valores numéricos porque os resultados obtidos com máquinas manuais antigas não podem representar aqueles de uma máquina de ensaio de dureza automática moderna, projetada para produzir impressões no menor tempo possível.
- 4.1.4 A estimativa da incerteza está descrita no documento apropriado EA/4-02 [1]. O cálculo da incerteza deve ser realizado de maneiras diferentes, dependendo dos tipos de dados disponíveis. O primeiro passo é a avaliação das apropriadas variâncias correspondentes aos parâmetros de medição envolvidos (variáveis independentes).
- 4.1.5 Os resultados de medição fornecidos em um certificado de calibração, com a incerteza normalmente citada para um fator de abrangência $k=2$, permitem o cálculo da incerteza-padrão. É suficiente dividir a incerteza fornecida pelo fator de abrangência declarado. A declaração de conformidade também pode ser usada para estimar a incerteza-padrão, levando em conta o intervalo de tolerância $\pm a$. Convém que uma função de distribuição retangular seja usada, com a variância equivalente $u^2 = a^2/3$.
- 4.1.6 O segundo passo é o cálculo da incerteza-padrão combinada. Teoricamente, se a dureza H é o mensurando (variável dependente), isto pode ser representado como uma função das variáveis independentes de medição. Os símbolos utilizados são indicados na tabela 4.1.

$$H = f(F_0; F_i; r_i; \alpha; t_0; t_i; v_i; N; S) \quad (6)$$

Mais explicitamente, a equação é:

$$H = N - \frac{h}{S} + \sum \left(\frac{\partial H}{\partial x_i} \right) \Delta x_i \quad (7)$$

onde x_i são as variáveis independentes na eq. (9).

4.1.7 Utilizando os coeficientes de sensibilidade apropriados, ou seja, as derivadas parciais da variável dependente H contra as variáveis independentes x_i , obtém-se a fórmula para a estimativa da propagação de incertezas na aproximação das variáveis independentes não correlacionadas:

$$u^2(H) \approx \sum_{i=1}^n u_i^2(H) = \sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(x_i) \quad (8)$$

Na prática, as derivadas parciais podem ser aproximadas pelas razões incrementais:

$$u^2(H) = \left(\frac{\Delta H}{\Delta F_0}\right)^2 u^2(F_0) + \left(\frac{\Delta H}{\Delta F}\right)^2 u^2(F) + \left(\frac{\Delta H}{\Delta r}\right)^2 u^2(r) + \left(\frac{\Delta H}{\Delta \alpha}\right)^2 u^2(\alpha) + \left(\frac{\Delta H}{\Delta t_0}\right)^2 u^2(t_0) + \left(\frac{\Delta H}{\Delta t}\right)^2 u^2(t) + \left(\frac{\Delta H}{\Delta v}\right)^2 u^2(v) + \left(\frac{\Delta H}{\Delta h}\right)^2 u^2(h) \quad (9)$$

4.1.8 A incerteza-padrão pode ser estimada para condições diferentes. Como exemplo, a tabela 4.2 mostra a estimativa da incerteza-padrão $u(H)$, e a incerteza expandida com fator de abrangência $k=2$, para a avaliação da conformidade das máquinas de ensaio de dureza e os penetradores de acordo com a norma apropriada [2]. Isto foi realizado utilizando as tolerâncias apropriadas para calcular as incertezas-padrão do tipo B.

Tabela 4.1: Símbolos utilizados

H	Dureza medida	t	Tempo de manutenção da força de ensaio total	u_d	Incerteza da definição da escala de dureza
F_0	Força de ensaio inicial	v	Velocidade de penetração	u_m	Incerteza da máquina de padronização primária de dureza
F	Força de ensaio total	h	Profundidade de penetração	u_s	Incerteza da estabilidade da máquina de calibração
r	Raio do penetrador	N	Constante dependente da escala	u_f	Incerteza ajustada
α	Ângulo do penetrador	S	Constante dependente da escala	v_i	Graus de liberdade
t_0	Tempo de manutenção da força de ensaio inicial				
H_b	Resultado da medição de dureza média do bloco de referência primária de dureza	s_c	Desvio-padrão das medições de H_c		
H_{bi}	Resultado da medição de dureza simples do bloco de referência primária de dureza	s_{ci}	Desvio-padrão das medições de H_{ci}		
u_{bd}	Incerteza da calibração de blocos de referência primária de dureza considerando a definição da escala	H_c	Valores de dureza médios da escala da máquina de calibração		
u_{bm}	Incerteza da calibração de blocos de referência primária de dureza considerando a incerteza da máquina de padronização primária de dureza	H_{ci}	Valores de dureza simples da escala da máquina de calibração		
S_b	Desvio-padrão da medição de H_b	u_{cdf}	Incerteza da máquina de calibração considerando a incerteza da definição da escala e a incerteza		

			ajustada
S_{bi}	Desvio-padrão da medição de H_{bi}	U_{cmf}	Incerteza da máquina de calibração considerando a incerteza da máquina de padronização primária e a incerteza ajustada
U_{cd}	Incerteza de calibração da máquina de calibração considerando a definição da escala	U_{cdu}	Incerteza da máquina de calibração considerando a incerteza da definição da escala e os resultados de calibração não-corrigidos
U_{cm}	Incerteza de calibração da máquina de calibração considerando a incerteza da máquina de padronização primária de dureza	U_{cmu}	Incerteza da máquina de calibração considerando a incerteza da máquina de padronização primária e os resultados de calibração não-corrigidos
ΔH	Valor de correção		

Tabela 4.2: Estimativa da propagação da incerteza para a avaliação da conformidade da máquina de ensaio de dureza e do penetrador.

x_i	a_i	$u^2(x_i) = \frac{a_i^2}{3}$	Coeficientes de sensibilidade em diferentes níveis de dureza			Contribuições para $u^2(H)/HRC^2$ em diferentes níveis de dureza		
			$c_i = \frac{\Delta H}{\Delta x_i}$	20 até 25	40 até 45	60 até 65	20 até 25	40 até 45
F_0/N	2	$1,3 \cdot 10^0$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$7,0 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$
F/N	15	$7,5 \cdot 10^{+1}$	$-4,0 \cdot 10^{-2}$	$-3,0 \cdot 10^{-2}$	$-2,0 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$6,8 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$
$\alpha /^\circ$	0,35	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^0$	$8,0 \cdot 10^{-1}$	$4,0 \cdot 10^{-1}$	$6,9 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$
r/mm	0,01	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{+1}$	$3,0 \cdot 10^{+1}$	$5,0 \cdot 10^{+1}$	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$
$h/\mu m$	1	$3,3 \cdot 10^{-1}$	$-5,0 \cdot 10^{-1}$	$-5,0 \cdot 10^{-1}$	$-5,0 \cdot 10^{-1}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$
$v/(\mu m/s)$	25	$2,1 \cdot 10^{+2}$	$-2,0 \cdot 10^{-2}$	$0,0 \cdot 10^0$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$8,4 \cdot 10^{-2}$	$0,0 \cdot 10^0$	$1,9 \cdot 10^{-1}$
t_0/s	1,5	$7,5 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$
t/s	2	$1,3 \cdot 10^0$	$-7,0 \cdot 10^{-2}$	$-4,0 \cdot 10^{-2}$	$-3,0 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
TOTAL $u^2/HRC^2 = \sum u_i^2/HRC^2$						0,39	0,22	0,40
Incerteza padrão u/HRC						0,62	0,46	0,63
Incerteza expandida $U/HRC = ku/HRC$						1,25	0,93	1,26

4.1.9 A tabela 4.3 mostra a estimativa das incertezas padrão e expandida para certificados de calibração para a máquina de ensaio de dureza e o penetrador. Aqui, o exemplo é para o nível de dureza de 20 HRC até 25 HRC. Note-se que as diferenças entre o parâmetro e os valores nominais são conhecidas, junto com as suas incertezas, e, portanto, é possível estimar a correção ΔH_i e a sua incerteza $u(\Delta H_i)$ utilizando os mesmos coeficientes de sensibilidade, da mesma maneira que antes.

4.1.10 Enquanto que no caso das contribuições de incerteza do tipo B os graus de liberdade ν_i dos vários parâmetros podem ser considerados como grandes o suficiente para aplicar a distribuição gaussiana, neste caso ν_i depende do procedimento de medição adotado. A tabela 4.3 cita valores típicos de ν_i .

Tabela 4.3: Estimativa da propagação de incerteza nos certificados de calibração para a máquina de ensaio de dureza e para o penetrador em um nível de dureza de 20 HRC até 25 HRC

X_i	Dados do certificado			$c_i = \frac{\Delta H}{\Delta x_i}$	Dureza medida		
	Δx_i	$U(2s)$	ν_i		ΔH_i	$u_i^2(H)$	$u_i^4(H) / \nu_i$
					HRC	HRC ²	HRC ⁴
F_0/N	0,8	0,2	8	$1,2 \cdot 10^{-1}$	0,10	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-9}$
F/N	-4,3	1,5	8	$-4,0 \cdot 10^{-2}$	0,17	$9,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$
$\alpha / ^\circ$	0,2	0,1	8	$1,3 \cdot 10^0$	0,26	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$
r / mm	0,007	0,002	8	$1,5 \cdot 10^{+1}$	0,11	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-9}$
$h / \mu\text{m}$	-0,5	0,2	3	$-5,0 \cdot 10^{-1}$	0,25	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$
$v / (\mu\text{m/s})$	20	5	2	$-2,0 \cdot 10^{-2}$	-0,40	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-6}$
t_0 / s	1	0,5	3	$1,0 \cdot 10^{-2}$	0,01	$6,3 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-11}$
t / s	1	0,5	3	$-7,0 \cdot 10^{-2}$	-0,07	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-8}$
Total					0,42	0,011	$7,6 \cdot 10^{-6}$
Incerteza-padrão u / HRC						0,10	
Graus de liberdade						15	
Fator de abrangência k para um nível de confiança $p = 95\%$						2,13	
Incerteza expandida $U / \text{HRC} = k u / \text{HRC}$						0,22	
Onde $\Delta H_i = c_i \Delta x_i$ e $u_i^2(H) \approx c_i^2 u^2(x_i)$							

4.1.11 Este método só pode ser usado corretamente se os valores nominais estiverem definidos para os vários parâmetros. Se, como é o caso com normas correntes, existirem parâmetros que não são definidos como valores nominais com uma dada tolerância, mas como intervalos de probabilidade uniforme, então, a referência para um “valor nominal” não é possível. Em conseqüência, a incerteza calculada deste modo só pode ser aceita onde há um acordo preliminar sobre os “valores nominais” dos parâmetros de medição.

4.2 Incerteza de calibração do método de calibração indireto

4.2.0.1 O método de calibração indireta é baseado em uma cadeia metrológica. Uma seqüência típica é (cf. figura 1.1):

a) definição da escala de dureza;

- b) materialização da definição da escala de dureza por uma máquina de padronização primária de dureza;
- c) calibração de blocos de referência primária de dureza para a disseminação da escala de dureza;
- d) calibração da máquina de calibração de dureza para a produção industrial de blocos de referência de dureza;
- e) calibração de blocos de referência de dureza;
- f) calibração de máquinas de ensaio de dureza industriais utilizando blocos de referência de dureza;
- g) medição de dureza realizada com máquinas de ensaio de dureza industriais.

4.2.0.2 Também é possível ir diretamente do passo c) para o passo f), ou, depois do passo e) acrescentar a calibração de um máquina de ensaio de dureza “de inspeção” do sistema de qualidade industrial e, dentro do sistema de qualidade, calibrar blocos de referência de dureza necessários para a calibração de outras máquinas de ensaio de dureza utilizadas no próprio sistema da qualidade. Note-se que depois do passo d) os passos subsequentes são repetições dos anteriores. Em consequência, a descrição da estimativa da incerteza pode ficar restrita aos quatro primeiros passos.

4.2.1 Incerteza u_d da definição da escala de dureza Rockwell

- 4.2.1.1 A estimativa da incerteza u_d da definição da escala de dureza, e a sua materialização, é similar à estimativa da incerteza devido ao método de calibração direta, levando em conta as tolerâncias determinadas pela ISO 6508-3 [3]. A tabela 4.4 apresenta um exemplo de estimativa de incerteza. Note-se que as contribuições de incerteza são do tipo B, logo, é utilizado um fator de abrangência $k=2$.

Table 4.4: Estimativa da incerteza u_d devido à definição da escala Rockwell C e sua materialização

x	a	$u^2(x_i) = \frac{a_i^2}{3}$	Coeficientes de sensibilidade em diferentes níveis de dureza			Contribuições para $u^2(H)/HRC^2$ em diferentes níveis de dureza		
			$c_i = \frac{\Delta H}{\Delta x_i}$			$u^2(H) \approx \sum_{i=1}^n u_i^2(H) = \sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(x_i)$		
			20 até 25	40 até 45	60 até 65	20 até 25	40 até 45	60 até 65
F_0/N	0,2	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$7,0 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$6,4 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$
F/N	1,5	$7,5 \cdot 10^{-1}$	$-4,0 \cdot 10^{-2}$	$-3,0 \cdot 10^{-2}$	$-2,0 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$
$\alpha /^\circ$	0,1	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^0$	$8,0 \cdot 10^{-1}$	$4,0 \cdot 10^{-1}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$
r/mm	0,005	$8,3 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{+1}$	$3,0 \cdot 10^{+1}$	$5,0 \cdot 10^{+1}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$
$h/\mu m$	0,2	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$-5,0 \cdot 10^{-1}$	$-5,0 \cdot 10^{-1}$	$-5,0 \cdot 10^{-1}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$
$v/(\mu m/s)$	10	$3,3 \cdot 10^{+1}$	$-2,0 \cdot 10^{-2}$	$0,0 \cdot 10^0$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$0,0 \cdot 10^0$	$3,0 \cdot 10^{-2}$
t_0/s	1,5	$7,5 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$
t/s	2	$1,3 \cdot 10^0$	$-7,0 \cdot 10^{-2}$	$-4,0 \cdot 10^{-2}$	$-3,0 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
TOTAL	$\frac{u_d^2}{HRC^2} = \sum \frac{u_i^2}{HRC^2}$					0,03	0,02	0,06
Incerteza-padrão	$\frac{u_d}{HRC}$					0,18	0,13	0,24
Incerteza expandida	$\frac{U}{HRC} = k \frac{u_d}{HRC}$					0,36	0,26	0,47

4.2.1.2 Os valores estimados são comprovados pelos resultados obtidos em comparações internacionais, especialmente aquelas envolvendo o maior número de participantes, as quais mostram uma dispersão nos resultados de cerca de $\pm 0,5$ HRC.

4.2.2 Incerteza da materialização da definição da escala de dureza Rockwell

4.2.2.1 Para demonstrar uma estimativa de incerteza para as características de máquinas de padronização primária de dureza no estado da arte, pode-se realizar um cálculo similar àquele da tabela 4.3, levando em conta as incertezas relevantes, como mostrado na tabela 4.5. Os resultados são otimistas porque os parâmetros significativos, tal como o desempenho do penetrador, não são computados, porém eles devem ser considerados como inerentes à incerteza devido à definição. Pode-se perceber que a incerteza da máquina é praticamente desprezível quando comparada ao efeito das tolerâncias fornecidas pela definição, com as contribuições da incerteza provenientes das grandezas de influência estando ausentes na própria definição.

Tabela 4.5: Estimativa da incerteza u_m baseada no estado da arte da máquina de padronização primária de dureza para o nível de dureza de 20 HRC até 25 HRC.

X_i	Dados do certificado			$c_i = \frac{\Delta H}{\Delta x_i}$	Dureza medida		
	Δx_i	$u_i(2\sigma)$	ν_i		ΔH_i	$u_i^2(H)$	$u_i^4(H)/\nu_i$
					HRC	HRC ²	HRC ⁴
F_0/N	0,01	0,01	20	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$	$6,5 \cdot 10^{-15}$
F/N	0,15	0,05	20	$-4,0 \cdot 10^{-2}$	$-6,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-14}$
$\alpha /^\circ$	0,05	0,02	20	$1,3 \cdot 10^0$	$6,5 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-9}$
r/mm	0,003	0,001	20	$1,5 \cdot 10^{+1}$	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-10}$
$h/\mu\text{m}$	0,1	0,05	20	$-5,0 \cdot 10^{-1}$	$-5,0 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$
$v/(\mu\text{m/s})$	5	2	10	$-2,0 \cdot 10^{-2}$	$-1,0 \cdot 10^{-1}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-8}$
t_0/s	0,5	0,2	10	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-13}$
t/s	0,5	0,2	10	$-7,0 \cdot 10^{-2}$	$-3,5 \cdot 10^{-2}$	$4,9 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-10}$
Total					-0,07	0,001	$1,9 \cdot 10^{-8}$
Incerteza-padrão u_m/HRC						0,03	
Graus de liberdade						36	
Fator de abrangência k para um nível de confiança $p = 95\%$						2,03	
Incerteza expandida $U/\text{HRC} = ku/\text{HRC}$						0,06	
Onde $\Delta H_i = c_i \Delta x_i$ e $u_i^2(H) \approx c_i^2 u^2(x_i)$							

4.2.2.2 Logo, o valor da incerteza é, primariamente, o resultado de tolerâncias dos parâmetros de medição prescritos pelas normas pertinentes. Embora a tabela 4.4 não leve em conta a contribuição devido à máquina de padronização primária de dureza para a materialização da própria definição, isto pode ainda ser considerada uma estimativa abrangente.

4.2.3 Incerteza da calibração dos blocos de referência primária de dureza Rockwell

4.2.3.1 O bloco de referência primária de dureza é calibrado por uma máquina de padronização primária de dureza fazendo-se cinco medições de dureza H_{bi} . O valor médio H_b é considerado como o valor de dureza do bloco.

4.2.3.2 A repetição da medição revela os efeitos da não-uniformidade da superfície do bloco de referência e da repetitividade da máquina de padronização primária de dureza, incluindo a sua resolução. Outros efeitos, tal como a estabilidade da dureza dos blocos de referência, devem ser

estimados de acordo com a experiência com os blocos de referência e as suas condições de manutenção.

4.2.3.3 Exceto por uma possível deriva que deve ser estimada separadamente, a incerteza u_{bd} ou u_{bm} de H_b pode ser estimada a partir da incerteza devido à definição da escala u_d dada na Tabela 4.4, combinada com o desvio-padrão s_b de H_b estimado com o uso do desvio-padrão s_{bi} das medições H_{bi} .

4.2.3.4 As incertezas u_{bd} ou u_{bm} são dadas por:

$$s_{bi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (H_{bi} - H_b)^2}{4}} \quad (10)$$

$$s_b = \frac{s_{bi}}{\sqrt{5}} \quad (11)$$

$$u_{bd} = \sqrt{u_d^2 + s_b^2} \quad \text{ou} \quad u_{bm} = \sqrt{u_m^2 + s_b^2} \quad (12)$$

4.2.3.5 O certificado de calibração deve declarar pelo menos o valor da incerteza-padrão u_{bd} .

É necessário também o valor de u_{bm} . Valores explícitos para as contribuições da incerteza [5,6] podem ser incluídos para informação.

4.2.4 Incerteza da calibração de máquinas de calibração Rockwell

4.2.4.1 O bloco de referência de dureza é calibrado por uma máquina de calibração de dureza fazendo-se cinco medições de dureza H_{ci} . O valor médio H_c é comparado com a dureza do bloco H_b para calibrar a máquina para esta escala e esta dureza ($\Delta H = H_c - H_b$).

4.2.4.2 A repetição da medição revela os efeitos da não-uniformidade da superfície do bloco de referência e da repetitividade da máquina de calibração de dureza, incluindo a sua resolução. Portanto, exceto pela estabilidade da máquina de calibração u_s que deve ser estimada separadamente porque depende das condições de trabalho, a incerteza u_{cd} ou u_{cm} de H_c pode ser estimada através da combinação da incerteza apropriada, devido ao bloco de referência de dureza u_{bd} ou u_{bm} , com o desvio-padrão s_c de H_c calculado com o uso do desvio-padrão s_{ci} das medições H_{ci} .

4.2.4.3 Para minimizar a incerteza, a correção ΔH deve ser aplicada pela dureza medida. Para obter a incerteza u_{cdf} ou u_{cmf} em qualquer ponto da escala da máquina, deve-se interpolar os resultados de ΔH . A incerteza devido ao ajuste u_f depende da estrutura e das características de trabalho da máquina

de calibração e, portanto, recomenda-se que seja determinada para caracterizar a máquina em si através de uma calibração em cinco níveis de dureza, comparando-se a parábola dos mínimos quadrados com a parábola que passa nos três pontos no nível de dureza escolhido para as checagens periódicas subsequentes.

4.2.4.4 Para as incertezas u_{cdf} ou u_{cmf} tem-se:

$$s_{ci} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (H_{ci} - H_c)^2}{4}} \quad (13)$$

$$s_c = \frac{s_{ci}}{\sqrt{5}} \quad (14)$$

$$u_{cd} = \sqrt{u_{bd}^2 + s_c^2} \text{ ou } u_{cm} = \sqrt{u_{bm}^2 + s_c^2} \quad (15)$$

$$u_{cdf} = \sqrt{u_{cd}^2 + u_f^2} \text{ ou } u_{cmf} = \sqrt{u_{cm}^2 + u_f^2} \quad (16)$$

se a correção ΔH não for aplicada, a incerteza u_{cdu} e u_{cmu} são calculadas utilizando:

$$u_{cdu} = \sqrt{u_{cd}^2 + \Delta H^2} \text{ ou } u_{cmu} = \sqrt{u_{cm}^2 + \Delta H^2} \quad (17)$$

4.2.4.5 O certificado de calibração deve declarar pelo menos o valor da incerteza-padrão u_{cdf} .

É necessário também o valor de u_{cmf} . Valores explícitos para as contribuições da incerteza [5,6] podem ser incluídos para informação.

4.2.5 Incerteza da calibração de blocos de referência de dureza e máquinas de ensaio

Para a calibração de blocos de referência de dureza e máquinas de ensaio de dureza são usados os mesmos procedimentos que foram descritos acima para a calibração de blocos de referência primária de dureza e máquinas de calibração de dureza. As fórmulas dadas para esses casos devem ser usadas.

4.2.6 Exemplo numérico

A avaliação da incerteza pode ser descrita como no exemplo a seguir na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Cadeia de calibração indireta – Avaliação da incerteza

Nível de dureza	20 até 25	40 até 45	60 até 65
Definição e incerteza da máquina de padronização (u_d) (ver Tabela 4.4)	0,18	0,13	0,24
Calibração de bloco de referência primária de dureza			
Número de impressões	5	5	5
Não-uniformidade do bloco de referência primária de dureza e reprodutibilidade da máquina. Desvio-padrão relevante (s_b) (Eq. 10)	0,23	0,17	0,12
Desvio-padrão da média das impressões (s_b) (Eq. 11)	0,10	0,08	0,05
Incerteza do valor de dureza dos blocos de referência (u_{bd} ou u_{bm}) (Eq. 12)	0,21	0,15	0,25
Calibração da máquina de calibração de dureza			
Número de impressões	5	5	5
Não-uniformidade do bloco de referência primária de dureza e reprodutibilidade da máquina. Desvio-padrão relevante (s_c) (Eq. 13)	0,29	0,23	0,17
Desvio-padrão da média das impressões (s_c) (Eq. 14)	0,13	0,10	0,08
Incerteza do ajuste u_f	0,09	0,04	0,06
Incerteza da escala de dureza da máquina de calibração (u_{cdf} ou u_{cmf}) (Eq. 15 e Eq. 16)	0,26	0,18	0,26
Calibração do bloco de referência de dureza			
Número de impressões	5	5	5
Não-uniformidade do bloco de referência de dureza e reprodutibilidade da máquina. Desvio-padrão relevante (s_b) (Eq. 10)	0,29	0,23	0,17
Desvio-padrão da média das impressões (s_b) (Eq. 11)	0,13	0,10	0,08
Incerteza do valor de dureza dos blocos de referência de dureza (u_{bd} ou u_{bm}) (Eq. 12)	0,29	0,22	0,27
Graus de liberdade efetivos ν_j	30	26	42
Fator de abrangência	2,04	2,06	2,02
Incerteza expandida U	0,59	0,44	0,55

5 Referências

- [1] EA/4-02: *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*, December 1999
- [2] ISO 6508-2:1999: *Metallic materials – Rockwell hardness test – Part 2: Verification and calibration of the testing machine*
- [3] ISO 6508-3:1999: *Metallic materials – Rockwell hardness test – Part 3: Calibration of reference blocks*
- [4] Barbato, G.; Desogus, S.: *The meaning of the geometry of Rockwell indenters* IMGC - Technical Report, No. R128, 1978, 6
- [5] Petik, F.: *The Unification of Hardness Measurement*; BIML, Paris, 1991, p.66-69
- [6] OIML SP 19/SR 4: *Compte-rendu de la comparaison internationale des échelles de dureté*, BIML, 1984