



MÉTODOS PARA A MEDIDA DO VOLUME DE DESGASTE EM ENSAIOS TRIBOLÓGICOS

Rafael M. Trommer¹, Márcia M. Maru¹, Jailton C. Damasceno¹, Carlos A. Achete^{1,2}

¹ Divisão de Metrologia de Materiais, Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, Duque de Caxias, RJ, 25250-020, Brasil, rmtrommer@inmetro.gov.br.

² Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PEMM), Univ. Federal do Rio de Janeiro, Cx. Postal 68505, Rio de Janeiro, 21945-970, RJ, Brasil;

Resumo: Neste trabalho, o estudo da medida do volume de desgaste do par esfera-disco foi realizado utilizando três métodos: gravimetria, perfilometria e microscopia óptica. Uma estimativa inicial para a incerteza de medição de cada método, utilizando modelos iniciais simplificados, também foi determinada. O desgaste foi gerado através da utilização um tribômetro CETR UMT3, sendo adotada a configuração esfera-sobre-disco. Apesar de certa diferença no volume de desgaste medido pelos diferentes métodos, os resultados podem ser considerados promissores, sendo necessários novos estudos com materiais de referência e comparações bilaterais para a validação dos métodos.

Palavras chave: desgaste, tribologia, gravimetria, perfilometria, microscopia óptica.

1. INTRODUÇÃO

Usualmente a medida de propriedades dos materiais tende a apresentar uma significativa dispersão entre os resultados de diversos laboratórios, principalmente devido aos procedimentos de medida. De acordo com a natureza do mensurando, a execução de um método de medida significa o desenvolvimento de um sistema de medida e um procedimento a ser seguido [1]. A confiança nos resultados exige não somente a rastreabilidade dos instrumentos e padrões utilizados, mas também a aplicação de um procedimento aceito de medida [2].

No caso da medida do volume de desgaste, este é um procedimento típico e frequentemente realizado em tribologia [3]. Devido ao uso e desenvolvimento de novos materiais que cada vez desgastam menos, a medida do volume de desgaste é considerada cada vez mais importante [4]. Entre os métodos básicos para a medida do volume de desgaste, está a medida da variação de massa, a medida das dimensões do componente desgastado e também a perfilometria [5, 6, 7].

A gravimetria é um dos métodos mais comuns utilizados para avaliar o desgaste [8]. Esta técnica apresenta como vantagem o fato de ser simples e precisa, enquanto que sua desvantagem é a transferência de material ou seu deslocamento que pode afetar a medida. Adicionalmente, a variação de massa em certos ensaios tribológicos pode ser muito pequena, usualmente na ordem de miligramas,

exigindo assim o uso de balanças analíticas com elevada resolução. Outra desvantagem do método gravimétrico é que não se podem obter informações a respeito do mecanismo de desgaste [8, 9].

A perfilometria a laser é uma técnica comumente utilizada para medir o volume desgastado a partir de medidas feitas em uma marca de desgaste [10, 11]. Ela se baseia na utilização de apalpadores de diamante, onde o seu movimento vertical (em níveis micrométricos) é convertido em sinal elétrico e amplificado para conversão em informações digitais processadas em um computador [11]. Uma das vantagens desta técnica é a possibilidade de se analisar a profundidade da marca de desgaste, o que não é possível pelos métodos gravimétricos e de microscopia óptica [4, 12]. As medidas por perfilometria são rápidas e precisas, sendo que é possível observar também a distribuição de desgaste entre as amostras. A desvantagem deste método é o custo elevado do equipamento [3].

A microscopia óptica, combinada com a análise da imagem, também tem aplicação na medida do desgaste [9]. Porém, as maiorias das superfícies desgastadas são rugosas, o que ocasiona em dificuldades em obter uma imagem em altas magnificações devido à limitação de profundidade. Também se deve considerar que a obtenção de imagens em alta resolução dispense tempo, é cara e demanda o uso de computadores [13].

Nenhuma técnica pode ser considerada completamente adequada para a medida de desgaste em particular. Na maioria dos casos, é necessário considerar as vantagens e desvantagens de cada método antes de escolher o mais apropriado para a medida do desgaste. Em certos casos, a execução de dois ou mais métodos pode permitir a obtenção de resultados mais confiáveis. Assim, este trabalho avaliou a utilização do método gravimétrico, perfilometria e microscopia óptica para a medida do volume de desgaste, bem como a estimativa de incerteza de medição de cada método.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Equipamento

O desgaste nas amostras foi realizado em um tribômetro CETR UMT3, sendo que a configuração escolhida para o ensaio foi esfera-sobre-disco. Os parâmetros de ensaio foram: velocidade de rotação de 15000 RPM com raio de rotação de 20 mm, carga de 10 N, duração de 60 minutos e sem lubrificação.

2.1. Esfera e disco

O material do disco foi um aço baixo carbono, com espessura de 1 mm e raio de 63 mm. A esfera utilizada foi de aço 52100 com diâmetro aproximadamente de 6,35 mm. Antes e após cada ensaio, as amostras foram limpas em banho de ultrassom com etanol por 5 minutos, para evitar a presença de partículas contaminantes nas amostras.

2.2. Medida do volume de desgaste

Três métodos foram utilizados para medir o volume de desgaste: gravimetria, perfilometria e microscopia óptica. O volume de desgaste por gravimetria foi determinado através variação de massa das amostras após o ensaio. Para tal, foi utilizada uma balança Mettler Toledo (modelo XS205). Uma vez que a massa específica do material é conhecida, o volume de desgaste foi determinado através da Equação 1.

$$V = \frac{(m_{final} - m_{inicial})}{\rho} \quad (1)$$

Onde V é o volume de desgaste, m é a massa e ρ é a massa específica do material. Para a esfera de aço 52100, a massa específica foi $7,7792 \text{ g/cm}^3 \pm 0,0046 \text{ g/cm}^3$. Já para o disco de aço baixo carbono, considerou-se a massa específica de $7,851 \text{ g/cm}^3 \pm 0,069 \text{ g/cm}^3$.

Para medir o volume de desgaste por perfilometria, utilizou-se um equipamento Taylor-Hobson (modelo PGI830). Para a esfera, inicialmente foi obtido o mapa 3D da região de desgaste, em uma área de $4 \times 2 \text{ mm}$ com 10 pontos de medida e velocidade de medição de $0,25 \text{ mm/s}$. Utilizando o *software* Ultra[®], a superfície 3D foi nivelada e a área de desgaste delimitada manualmente. Após estas etapas, foi possível determinar através do *software* Ultra[®] o volume de desgaste. Para o disco, foram feitas medidas da superfície 3D da trilha de desgaste em 8 regiões, angularmente espaçadas em 45° . Na superfície 3D resultante da análise, obteve-se o perfil de cada uma das trilhas e determinou-se a área de desgaste transversal. Assim, o volume de desgaste foi determinado de acordo com a Equação 2.

$$V = \pi \cdot A (R_{EXT} + R_{INT}) \quad (2)$$

Onde V é o volume de desgaste, R_{ext} é o raio externo e R_{int} é o raio interno da trilha de desgaste, e A é a área transversal média da trilha.

O ultimo método utilizado para determinar o volume de desgaste foi a microscopia óptica. Não foi possível obter o

volume de desgaste do disco com este método. Primeiramente, obteve-se a imagem da marca de desgaste na esfera em um microscópio Olympus (modelo BX51M). Neste mesmo microscópio e nas mesmas magnificações, a imagem da escala padrão de 1 mm também foi obtida. Esta escala foi definida como padrão de comprimento para as medidas do diâmetro da calota de desgaste, realizadas com o auxílio do *software* ImageTool[®]. O volume de desgaste da esfera foi calculado de acordo com a Equação 3, considerando-se o volume de uma calota esférica.

$$V = \frac{\pi \cdot d^4}{64 \cdot R} \quad (3)$$

Onde V é o volume de desgaste, d é o diâmetro médio da calota e R é o raio da esfera de aço.

3. ESTIMATIVA DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

Foram utilizados os critérios recomendados no Guia para Expressão da Incerteza de Medição (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement - ISO GUM*) [14]. A estimativa das incertezas de medição, para cada método, foi realizada para a esfera e disco, quando possível.

Para todos os casos de estimativa de incerteza descritos neste trabalho, o mensurando (grandeza específica que está sendo submetida à medição) é o volume de desgaste (V).

3.1 Procedimento para a estimativa de incerteza de medição pelo método gravimétrico

O modelo matemático inicial para medir o volume de desgaste por gravimetria, tanto para o disco como a esfera, é descrito na Equação 1. As massas inicial e final foram medidas 5 vezes. As grandezas de entrada do tipo A para este modelo são: repetição da medida da massa inicial e da massa final. Já as grandezas de entrada do tipo B são: certificado da massa específica e certificado da balança. O desvio padrão da massa inicial do disco foi $0,0000187 \text{ g}$ e da esfera foi $0,0000148 \text{ g}$. Para a massa final, os desvios padrões foram $0,0000054 \text{ g}$ e $0,000025 \text{ g}$ para o disco e esfera, respectivamente. A incerteza devido à repetitividade das medidas foi determinada de acordo com a Equação 4.

$$u_M = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

Onde s é o desvio padrão das n repetições.

A incerteza-padrão, relacionada à probabilidade de ocorrência do valor de um desvio-padrão para a massa específica e a balança foi determinada utilizando a Equação 5. A incerteza declarada da massa específica foi $0,0046 \text{ g/cm}^3$ e da balança foi $0,07 \text{ mg}$, para coeficientes de abrangência (k) de 2,133 e 2 respectivamente.

$$u_{certificado} = \frac{U_{declarado}}{k} \quad (5)$$

Os coeficientes de sensibilidade para a esfera e o disco foram calculados de acordo com as Equações 6 a 8.

$$c_{m_{inicial}} = \frac{\partial V}{\partial m_{inicial}} = -\frac{1}{\rho} \quad (6)$$

$$c_{m_{final}} = \frac{\partial V}{\partial m_{final}} = \frac{1}{\rho} \quad (7)$$

$$c_{\rho} = \frac{\partial V}{\partial \rho} = -\frac{(m_{inicial} - m_{final})}{\rho^2} \quad (8)$$

A incerteza combinada (u_c) do volume de desgaste do disco e da esfera foi calculada segundo a Equação 9, combinando-se as incertezas-padrão já determinadas.

$$u_c^2(V) = \left[\frac{\partial V}{\partial m_i} \right]^2 \cdot u^2(m_i) + \left[\frac{\partial V}{\partial m_f} \right]^2 \cdot u^2(m_f) + \quad (9)$$

$$\left[\frac{\partial V}{\partial m_i} \right]^2 \cdot u^2(bal) + \left[\frac{\partial V}{\partial m_f} \right]^2 \cdot u^2(bal) + \left[\frac{\partial V}{\partial \rho} \right]^2 \cdot u^2(\rho)$$

Para determinar a incerteza expandida de medição, utilizou-se a incerteza padrão combinada, calculada de acordo com a Equação 9, e o fator de abrangência k , calculado de acordo com os graus de liberdade efetivos obtidos pela Equação 10 com nível de confiança de 95 %.

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\frac{u^4(m_i)}{4} + \frac{u^4(m_f)}{4}} \quad (10)$$

O valor obtido no cálculo dos graus de liberdade efetivos, de acordo com a tabela para a distribuição-t, retorna como fator de abrangência para uma probabilidade de 95 % de confiança o valor de k igual a 1,965 tanto para a esfera quanto para o disco. Com isto, é possível obter a incerteza expandida de medição.

3.2 Procedimento para a estimativa de incerteza de medição pelo método de microscopia óptica

Para medir o volume de desgaste da esfera por microscopia óptica, utilizou-se o modelo matemático da Equação 3. O diâmetro da calota (d) foi medido 10 vezes e o raio da esfera (R) 15 vezes. As grandezas de entrada do tipo A para este modelo são: repetição da medida do diâmetro da calota e do raio da esfera. Já as grandezas de entrada do tipo B são: certificado da régua graduada e certificado da esfera padrão de quartzo. O desvio padrão do diâmetro da calota foi 0,012693 mm e do raio da esfera foi 0,00141 mm. A repetitividade foi então calculada de acordo com a Equação 4. A incerteza-padrão para a régua graduada e a esfera padrão de vidro foi determinada utilizando a Equação 5.

Os coeficientes de sensibilidade para a esfera e o disco foram calculados de acordo com as Equações 11 e 12.

$$c_d = \frac{\partial V}{\partial d} = \frac{\pi \cdot d^3}{16 \cdot R} \quad (11)$$

$$c_R = \frac{\partial V}{\partial R} = -\frac{\pi \cdot d^4}{64 \cdot R^2} \quad (12)$$

A incerteza combinada (u_c) do volume de desgaste foi calculada utilizando a Equação 13, pela combinação das incertezas-padrão antes determinadas.

$$u_c^2(V) = \left[\frac{\partial V}{\partial d} \right]^2 \cdot u^2(d) + \left[\frac{\partial V}{\partial R} \right]^2 \cdot u^2(R) + \left[\frac{\partial V}{\partial R} \right]^2 \cdot u^2(esf) + \quad (13)$$

$$\left[\frac{\partial V}{\partial d} \right]^2 \cdot u^2(régua)$$

A incerteza expandida de medição foi calculada utilizando a incerteza padrão combinada, calculada de acordo com a Equação 13, e o fator de abrangência k , calculado de acordo com os graus de liberdade efetivos obtidos pela Equação 14 com nível de confiança de 95 %.

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\frac{u^4(d)}{9} + \frac{u^4(R)}{14}} \quad (14)$$

Com o valor obtido no cálculo dos graus de liberdade efetivos, e empregando a tabela para a distribuição-t como fator de abrangência para uma probabilidade de 95 % de confiança, o valor de k foi igual a 2,26. Com estes dados foi obtida a incerteza expandida de medição.

3.2 Procedimento para a estimativa de incerteza de medição pelo método de perfilometria

O modelo matemático apresentado na Equação 2 foi utilizado para medir o volume de desgaste do disco pelo método perfilométrico. Foram realizadas 8 medidas da área de desgaste e 5 medidas do raio interno e 5 medidas do raio externo. As grandezas de entrada do tipo A são a área de desgaste e o raios interno e externo da trilha de desgaste. O certificado do raio da trilha de desgaste é uma grandeza de entrada do tipo B. O desvio padrão da área de desgaste obtida no software *Ultra*[®] foi 0,002839 mm². Para o raio da trilha de desgaste, a média foi 20,83 mm com desvio padrão de 0,000202 mm para o raio externo e 19,72 mm com desvio padrão de 0,0130 mm para o raio interno. O cálculo da repetitividade das grandezas de entrada do tipo A, utilizou-se a equação 4. Já para as grandezas do tipo B, a equação 5 foi utilizada. Os coeficientes de sensibilidade foram calculados de acordo com as Equações 15 e 16.

$$c_A = \frac{\partial V}{\partial A} = \pi \cdot (R_{EXT} + R_{INT}) \quad (15)$$

$$c_R = \frac{\partial V}{\partial R} = \pi \cdot A \quad (16)$$

Utilizando a Equação 17, foi possível calcular a incerteza combinada (u_c) do volume de desgaste do disco, pela combinação das incertezas-padrão antes determinadas.

$$u_c^2 = \left[\frac{\partial V}{\partial A} \right]^2 \cdot u^2(A) + \left[\frac{\partial V}{\partial R_{INT}} \right]^2 \cdot u^2(R_{INT}) + \left[\frac{\partial V}{\partial R_{EXT}} \right]^2 \cdot u^2(R_{EXT}) + \quad (17)$$

$$\left[\frac{\partial V}{\partial R_i} \right]^2 \cdot u^2(cert) + \left[\frac{\partial V}{\partial R_f} \right]^2 \cdot u^2(cert)$$

Para o cálculo da incerteza expandida de medição, utilizou-se a incerteza padrão combinada calculada de acordo com a Equação 17, e o fator de abrangência k , calculado de acordo com os graus de liberdade efetivos obtidos pela Equação 18 com nível de confiança de 95 %.

$$V_{eff} = \frac{u_c^4}{\frac{u^4(A)}{7} + \frac{u^4(R_{EXT})}{4} + \frac{u^4(R_{INT})}{4}} \quad (18)$$

Com o valor dos graus de liberdade efetivos e com a tabela de distribuição-t como fator de abrangência para uma probabilidade de 95 % de confiança, o valor de k foi igual a 2,36. Assim foi possível obter a incerteza expandida de medição.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os volumes de desgaste e a incerteza expandida da esfera e disco para os métodos descritos neste trabalho são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Volume de desgaste e incerteza expandida determinada para cada um dos métodos.

Método	Esfera	Disco
Gravimetria	0,046 mm ³ ± 0,013 mm ³	0,383 mm ³ ± 0,013 mm ³
Perfilometria	0,0384 mm ³	0,362 mm ³ ± 0,022 mm ³
Microscopia óptica	0,0408 mm ³ ± 0,0011 mm ³	-

Pode-se observar que os valores medidos de volume de desgaste, tanto para a esfera quanto para o disco, apresentaram certa dispersão nos resultados. A menor incerteza expandida para esfera foi determinada para a microscopia óptica, enquanto que para o disco, a menor incerteza expandida foi determinada pela gravimetria.

As estimativas de incertezas de medição do volume de desgaste do disco e da esfera, para o método gravimétrico, são apresentadas nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2. Incerteza do volume de desgaste do disco por gravimetria.

Fontes de incerteza	Incerteza padrão	Coefficiente de sensibilidade	Componente de incerteza
Massa inicial repetição (u_{m1})	8,36E-06 [g]	127,37 [mm ³ /g]	0,0011 [mm ³]
Massa final repetição (u_{m2})	2,44E-06 [g]	127,37 [mm ³ /g]	0,0003 [mm ³]
Certificado da balança: massa inicial (u_b)	3,50E-05 [g]	127,37 [mm ³ /g]	0,0044 [mm ³]
Certificado da balança: massa final (u_b)	3,50E-05 [g]	127,37 [mm ³ /g]	0,0044 [mm ³]
Massa específica certificado (u_p)	3,40E-05 [g/mm ³]	48,76 [mm ⁶ /g]	0,0016 [mm ³]

No método gravimétrico, são realizadas medidas das massas iniciais e finais. Estas medidas de massa são

realizadas em uma balança analítica calibrada e que tem sua incerteza de medição conhecida. Além disso, a massa específica do material é obtida por certificado, tendo a sua incerteza de medição conhecida.

Observa-se que, tanto para a incerteza de medição do disco quanto da esfera, o maior componente de incerteza provém do certificado de calibração da balança. Para as medidas de massa realizadas neste trabalho, um modo de diminuir a incerteza de medição pode ser o uso de outra balança. Outras fontes de incerteza podem ser adicionadas ao modelo, como a possível contaminação da amostra e a variação da temperatura e umidade [13].

Tabela 3. Incerteza do volume de desgaste da esfera por gravimetria.

Fontes de incerteza	Incerteza padrão	Coefficiente de sensibilidade	Componente de incerteza
Massa inicial repetição (u_{m1})	6,63E-06 [g]	128,54 [mm ³ /g]	0,00085 [mm ³]
Massa final repetição (u_{m2})	1,12E-05 [g]	128,54 [mm ³ /g]	0,0014 [mm ³]
Certificado da Balança: massa inicial (u_b)	3,50E-05 [g]	128,54 [mm ³ /g]	0,0045 [mm ³]
Certificado da Balança: massa final (u_b)	3,50E-05 [g]	128,54 [mm ³ /g]	0,0045 [mm ³]
Massa específica certificado (u_p)	2,0E-06 [g]	5,92 [mm ⁶ /g]	0,00001 [mm ³]

A medida do volume de desgaste da esfera por perfilometria exige a obtenção da superfície 3D da marca de desgaste. Após isto, se utiliza o software Ultra® para delimitar a área desgastada em que se deseja medir o volume de desgaste, conforme apresenta a Figura 1. Neste trabalho, não foi possível estimar a incerteza de medição, pois o volume de desgaste é obtido diretamente no software.

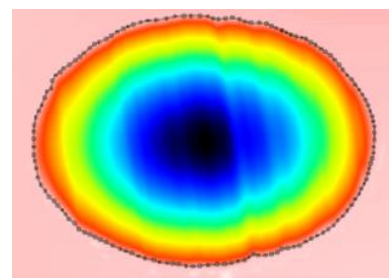


Fig. 1. Área de desgaste delimitada visualmente no software Ultra®.

A delimitação desta área depende da observação da pessoa que está realizando a medida, o que deve ser considerado futuramente na estimativa de incerteza [12]. Um modo de enriquecer esta estimativa de incerteza pode ser o aumento do número de pontos na medida da superfície 3D. A velocidade de medição também pode ser diminuída, ou seja, realizar uma varredura mais lenta da área de medida. Isto implicaria em uma resolução maior da superfície 3D obtida, permitindo uma delimitação visual mais precisa da área [11].

Tabela 4. Incerteza do volume de desgaste do disco por perfilometria.

Fontes de incerteza	Incerteza padrão	Coefficiente de sensibilidade	Componente de incerteza
Área de desgaste repetição (u_A)	7,14E-05 [mm ²]	127,41 [mm]	0,0091 [mm ³]
Raio interno repetição (u_{Rim})	5,8E-03 [mm]	0,0089 [mm ²]	0,000052 [mm ³]
Raio externo repetição (u_{Rest})	4,0E-03 [mm]	0,0089 [mm ²]	0,00004 [mm ³]
Certificado do raio (u_c)	1,5E-02 [mm]	0,0089 [mm ²]	0,00013 [mm ³]

No caso da medida do volume de desgaste do disco, ocorre a mesma situação encontrada na esfera, sendo necessário delimitar a área da seção transversal da trilha de desgaste. Conforme apresenta a Figura 2, deve-se considerar ainda que a trilha de desgaste possui uma seção transversal irregular, onde uma pequena variação no ponto determinado como sendo o limite da seção pode alterar significativamente a área e consequentemente o volume de desgaste.

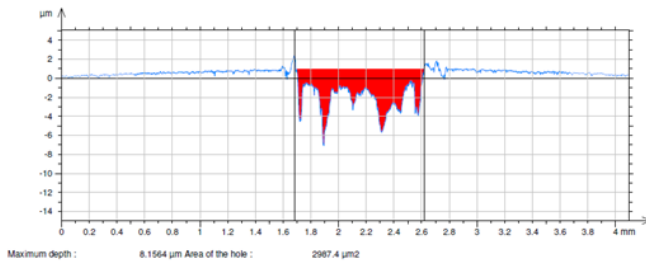


Fig. 2. Área da seção transversal da trilha de desgaste.

Um aspecto importante durante o uso da perfilometria diz respeito à calibração e rastreabilidade das medidas, o qual é um ponto que deve ser considerado em trabalhos futuros [15]. Atualmente, o *National Physical Laboratory* (NPL) possui um equipamento (denominado NanoSurf IV) que apresenta medidas de deslocamento rastreáveis nos eixos vertical e de varredura com uma incerteza de ordem nanométrica [16].

Para o método de microscopia óptica, a incerteza de medição do volume de desgaste da esfera é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5. Incerteza do volume de desgaste da esfera por microscopia óptica.

Fontes de incerteza	Incerteza padrão	Coefficiente de sensibilidade	Componente de incerteza
Diâmetro da calota repetição (u_d)	4,01E-03 [mm]	0,1280 [mm ²]	0,00051 [mm ³]
Raio da esfera repetição (u_r)	3,65E-05 [mm]	0,0128 [mm ²]	0,0000004 [mm ³]
Comprimento certificado (u_c)	1,00E-04 [mm]	0,1280 [mm ²]	0,000012 [mm ³]
Raio da esfera de vidro certificado (u_{cv})	1,00E-03 [mm]	0,0128 [mm ²]	0,000012 [mm ³]

O componente de incerteza devido à repetição da medida do diâmetro da calota de desgaste é o maior contribuinte para a incerteza da medida do volume de desgaste por este método. Analogamente ao método perfilométrico, o volume de desgaste medido pela microscopia óptica decorre de observações e delimitações feitas na tela do computador, conforme apresenta a Figura 3. De acordo com a Tabela 5, a maior contribuição para a incerteza de medição se deve à medida do diâmetro da calota de desgaste, que é resultado desta delimitação visual feita na tela do computador. Esta incerteza pode ser diminuída pelo uso da computação e suas tecnologias associadas, as quais permitiram inúmeros desenvolvimentos no processamento de imagem digital nos últimos anos [17, 18]. Além disto, diversos métodos computacionais para a detecção de contornos têm sido propostos, com destaque para os métodos de Gradient ou Laplacian que são muito simples e frequentemente usados [19].

A microscopia óptica também depende significativamente da qualidade do software utilizado para analisar os dados medidos [5]. A simplificação da área de desgaste gerada na esfera como sendo um círculo também podem contribuir para a fonte de incerteza da medição. Outro ponto importante é que as medidas do diâmetro da marca de desgaste utilizando o *software* necessitam de um padrão de comprimento, obtido a partir da imagem de uma régua padrão de 1 mm com incerteza determinada. Porém, o padrão de comprimento utilizado no *software* também considera uma delimitação feita na tela do computador.

Cada método apresenta suas vantagens e desvantagens. Comparada ao método de perfilometria e microscopia óptica, a gravimetria possui a vantagem de não necessitar de observações na tela do computador para determinar o volume de desgaste, o que pode introduzir erros de medida.

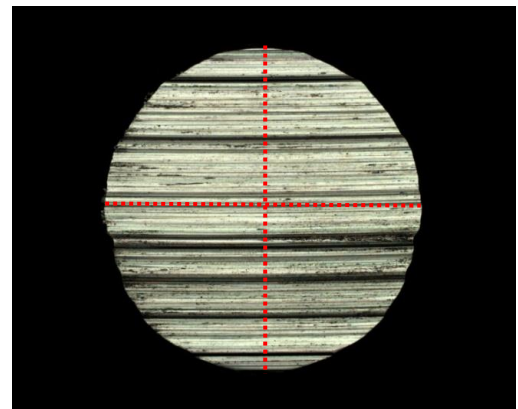


Fig. 3. Imagem obtida por microscopia óptica da área de desgaste gerada na esfera após o ensaio.

O uso de materiais de referência pode contribuir para a diminuição das incertezas de medição, bem como para a validação destes métodos e estabelecimento de rastreabilidade [1]. Trabalhos recentes mostraram que a perfilometria e gravimetria podem ser considerados métodos validados para a medida de volume de desgaste [9]. Comparações interlaboratoriais também contribuem para a

validação dos métodos. Sistemas ópticos modernos baseados na variação de foco ou princípios confocais também podem ser usados para efetivamente medir o desgaste [10].

Métodos de propagação de distribuições aplicados à metrologia, tais como a simulação de Monte Carlo [20], também podem ser utilizados para a validação da metodologia do GUM, superando algumas de suas limitações.

5. CONCLUSÃO

Os métodos apresentados neste trabalho se mostraram consistentes para a medida do volume de desgaste em ensaios tribológicos. A perfilometria e a microscopia óptica são métodos que dependem de observações na tela do computador, o que pode contribuir significativamente para a incerteza da medição. Ensaios com materiais de referência, bem como comparações interlaboratoriais são necessárias para a validação dos métodos. Os modelos utilizados para a estimativa de incerteza de medição podem ser aperfeiçoados, através da introdução de outras grandezas de entrada aos modelos.

REFERÊNCIAS

- [1] J.A. Salas-Tellez, J.A. Guardado-Perez, F. Rosas-Gutierrez, Y. Mitani, "A traceability scheme for materials metrology", *Metrologia*, S18-S22, v 47, 2010.
- [2] S. Bennett, J. Valdés, "Materials metrology", *Metrologia*, Foreword, v 47, 2010.
- [3] Y.C. Tassan, M.B. de Rooij, D.J. Schipper, "Measurement of wear on asperity level using image-processing techniques", *Wear*, pp 83-91, v 258, 2005.
- [4] L. Blunt, P. Bills, X. Jiang, C. Hardaker, G. Chakrabarty, "The role of tribology and metrology in the latest development of bio-materials", *Wear*, pp 424-431, v 266, 2009.
- [5] G.W. Stachowiak, A.W. Batchelor, G.B. Stachowiak, *Experimental Methods in Tribology*. 1 ed. Amsterdam, Elsevier, 2004.
- [6] M.B. de Rooij, D.J. Schipper, "A wear measurement method based on the comparison of local surface heights", *Wear*, pp 182-189, v 21, 1998.
- [7] C.S. Yust, P.J. Blau, "Precision Profilometry of Wear Scars on Curved Surfaces", *Journal of Testing and Evaluation*, pp 246-249, v 25 1997.
- [8] S. Carmignato, M. Spinelli, S. Affatato, E. Savio, "Uncertainty evaluation of volumetric wear assessment from coordinate measurements of ceramic hip joint prostheses", *Wear*, pp 584-590, v 270, 2011.
- [9] M. Tuke, A. Taylor, A. Roques, C. Maul, "3D linear and volumetric wear measurement on artificial hip joints—Validation of a new methodology", *Precision Engineering*, pp 777-783, v 34, 2010.
- [10] M.G. Gee, L. Brown, E. Bennett, "Optical evaluation of wear volumes", 13th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, pp 61-65, 2011.
- [11] P. Pawlus, "Digitisation of surface topography measurement results", *Measurement*, pp 672-686, v 40, 2007.
- [12] C. Godoy, R.F. Ávila, F.C. Marinho, M.M. Lima, A. M. Abrão, E. M. Paula e Silva, "Análise Topográfica por Perfilometria do Desgaste de Cratera em Ferramenta de Metal Duro Revestida com TiN", *Matéria*, pp 145-154, v 8, 2003.
- [13] X.Q. Hu, C.M. Han, R.J.K. Wood, "A geometric method to measure the wear of hip joint", *Wear* (2011), em publicação.
- [14] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, ISO, Switzerland, 1995.
- [15] R.F. Ávila, C. Godoy, A.M. Abrão, M.M. Lima, "Topographic analysis of the crater wear on TiN, Ti(C,N) and (Ti,Al)N coated carbide tools", *Wear*, pp49-56, v 265, 2008.
- [16] R.K. Leach, "NanoSurf IV: traceable measurement of surface texture at the National Physical Laboratory, UK", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, pp 2113-2121, v 41, 2001.
- [17] E. Kennard, R.K. Wilcox, R.M. Hall, "Validation of a digital image processing software package for the in vivo measurement of wear in cemented Charnley total hip arthroplasties", *Medical Engineering & Physics*, pp 356-362, v 28, 2006.
- [18] P.B. Costa, W.S. Barros, "Determinação da incerteza de medição na calibração da área de aberturas circulares", V Congresso Brasileiro de Metrologia, 2009.
- [19] M.-Y. Yang, Oh-dal Kwon, "Crater wear measurement using computer vision and automatic focusing", *Journal of Material; Processing Technology*, pp 362-367, v 58, 1996.
- [20] J.C. Damasceno, P.R.G. Couto, "A validação de um programa para o cálculo da estimativa de incerteza de medição pelo método de Monte Carlo", 1º Congresso Internacional De Metrologia Mecânica, 2008.