

UMA REVISÃO SOBRE ENSAIOS TRIBOLÓGICOS PARA MEDIR ABRASIVIDADE DE PARTÍCULAS DURAS

Tiago Alexandre Rosso, tiagoarosso@hotmail.com¹

Giuseppe Pintaúde, pintaude@utfpr.edu.br¹

Ane Cheila Rovani, acrovani@gmail.com¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Avenida Sete de Setembro, 3165, Rebouças – CEP 80230-901, Curitiba - PR

Resumo: A abrasão de materiais pode ser usada como meio de remoção de material por usinagem, ou ainda, ser mecanismo de remoção de materiais indesejado associado a processos produtivos, como cominuição de minérios. A capacidade de remoção pode ser atribuída a variações da concentração, geometria, dureza e distribuição de tamanho das partículas no fluido abrasivo. Logo, um melhor entendimento acerca da abrasividade das partículas faz-se necessário para uma melhor caracterização dos modos e mecanismos atuantes no processo. No presente trabalho, uma revisão dos seguintes ensaios para medir abrasividade é apresentada: ensaio de roda de borracha (ASTM G65), ensaio para determinação do índice de Miller (ASTM G75) e microabrasão, nas escalas micrométricas, e ensaio de britador de mandíbulas (ASTM G81), ensaio de abrasão por impacto cíclico e ensaio de abrasividade Cerchar, na escala milimétrica de tamanho de partículas. Em particular, futuras aplicações da medida de abrasividade usando o ensaio de microabrasão são apresentadas com maior detalhamento.

Palavras-chave: abrasividade, desgaste abrasivo, remoção de material, partículas duras.

1. INTRODUÇÃO

A abrasividade de partículas é uma propriedade importante em diferentes áreas. Pode-se citar por exemplo diferentes processos de usinagem (Komanduri et al, 1997), processos de extração mineral (Plinninger et al, 2008) e odontologia (Philpotts, 2005).

A capacidade de remoção de material por uma partícula abrasiva não é uma propriedade intrínseca, e como a resistência ao desgaste abrasivo é resultado da interação entre o material e o abrasivo, logo não se caracteriza uma propriedade de um material, mas de um sistema de materiais. O comportamento do material não depende somente de suas propriedades, mas também das propriedades do abrasivo, do projeto, da geometria das peças e das condições operacionais (Hutchings, 1992).

Um exemplo da utilização de abrasivos para a melhoria da qualidade superficial na indústria automotiva é o processo de usinagem por hidroerosão, o qual promove um arredondamento da região de entrada de componentes do sistema de injeção de motores a diesel (Coseglio et al, 2016). Um dos fatores mais importantes no processo de hidroerosão é o fluido, composto por partículas abrasivas dispersas neste fluido. O resultado e a eficiência do processo de hidroerosão estão intimamente ligados à combinação e interação entre o fluido, as partículas abrasivas e o material do componente.

O custo despendido com determinadas partículas abrasivas utilizadas no processo de hidroerosão figuram entre os mais altos entre os materiais de consumo para tal processo (Coseglio et al, 2016). Logo, tal fato torna-se um motivador para que abrasivos alternativos sejam encontradas de forma a reduzir o impacto econômico no processo de hidroerosão.

Efeitos de diferentes tipos de abrasivos sobre a integridade superficial de superfícies usinadas com fluxo abrasivo foram estudados por Gov et al. (2016). Quatro grupos de meios abrasivos foram preparados com diferentes tipos de abrasivos: SiC, Al₂O₃, B₄C e Garnet. A remoção do material e a dureza do abrasivo estão na mesma ordem: B₄C, SiC, Al₂O₃ e Garnet (do menor ao maior), logo a remoção do material está diretamente relacionada à dureza do abrasivo.

Diante do exposto, fica evidente que a análise da abrasividade das partículas abrasivas mostra-se importante para o estudo da eficiência da remoção de material. Como a quantificação do efeito da abrasividade ainda é deficiente, o estudo se propõe apresentar uma revisão de ensaios nas escalas micrométrica e milimétrica de tamanho de partículas e futuras aplicações da medida de abrasividade usando o ensaio de micro abrasão.

2. ABORDAGEM DE TIPOS DE ENSAIO PARA ANALISAR A ABRASIVIDADE

Uma revisão dos seguintes ensaios para medir abrasividade é apresentada: ensaio para determinação do número de Miller e do número SAR (ASTM G75), ensaio de roda de borracha (ASTM G65) e micro abrasão, nas escalas micrométricas, e ensaio de britador de mandíbulas (ASTM G81), ensaio de abrasão por impacto cíclico e ensaio de abrasividade Cerchar, na escala milimétrica de tamanho de partículas. Em particular, futuras aplicações da medida de abrasividade usando o ensaio de micro abrasão são apresentadas com maior detalhamento.

2.1. Ensaios para determinação do número de Miller e do número SAR (ASTM G75)

O ensaio que permite determinar um índice denominado número de Miller tem sido amplamente utilizado para medir a abrasividade relativa de muitas suspensões (Ureel et al, 2014). Em 2001 foi adotado pela ASTM que estabeleceu a norma G75 “Standard Test Method for Determination of Slurry Abrasivity (Miller Number) and Slurry Abrasion Response of Materials (SAR Number)”.

Esta norma apresenta um método de ensaio que descreve um procedimento laboratorial que pode ser usado para desenvolver dados relativos à abrasividade de qualquer lama (número de Miller) ou a resposta de diferentes materiais para a abrasividade de diferentes lamas (número SAR).

Conceitualmente, o número de Miller é uma medida de abrasividade relacionada à taxa de perda de massa de um bloco de metal padrão (liga Ferro-27%Cromo). O número é calculado a partir da curva de perda de massa acumulada em função do tempo, obtida com a realização de vários ensaios sucessivos e cumulativos (ASTM G75, 2015). A Figura (1) exibe um típico equipamento para o ensaio para determinação do número de Miller.



Figura 1. Equipamento típico para ensaio de abrasão para identificação do número de Miller. Ureel et al, 2014.

O Número SAR é uma medida da resposta à abrasão relativa de qualquer material em qualquer lama, onde se relacionam taxa de perda de massa de uma amostra, a partir da curva de perda de massa acumulada com o tempo obtida segundo o mesmo procedimento para determinação do número de Miller. A evolução do desgaste é registrada acumulando-se a perda de massa em intervalos regulares durante o ensaio (ASTM G75, 2015).

O ensaio para determinação do número SAR é mais abrangente que o ensaio para o número de Miller, pois ao invés de adotar um material padrão a ser desgastado, ele permite avaliar a resposta de vários materiais. Constitui-se, portanto, em um teste recomendado para a seleção adequada de materiais.

Embora os testes de lama usem principalmente condições de baixa abrasão, cenários de alta abrasão podem ser simulados. Testes de esforço elevado são apropriados para uso se forem necessários esforços para fraturar a rocha sendo testada (Ureel et al, 2014).

A abrasividade é uma função da concentração dos sólidos na lama e das seguintes características das partículas sólidas: dureza, tamanho, forma, distribuição de tamanho e friabilidade (ASTM G75, 2015).

2.2. Ensaios de roda de borracha (ASTM G65)

O equipamento para teste abrasivo roda de borracha é o mais utilizado para ensaios de abrasão a baixa tensão, cujo procedimento é estabelecido pela norma ASTM G65, 2016.

O seu princípio de funcionamento consiste em esmerilhar um corpo de prova padronizado com areia, cujo tamanho de grão e composição são controlados. O abrasivo é introduzido entre o corpo de prova e um anel de borracha de dureza especificada, provocando o riscamento.

Nesse equipamento, um motor de corrente contínua aciona o contra-corpo, que consiste de um disco metálico recoberto por um anel de borracha (estireno-butadieno) de dureza 60 Shore A (ASTM G65, 2016). Como ilustra a Fig. (2), a amostra é fixada a um sistema de alavanca que permite a aplicação de uma força normal à amostra via peso morto, enquanto o fluxo de abrasivo escoar por gravidade através de um tubo até a interface de desgaste, permitindo somente a presença de abrasivo novo durante a realização do ensaio de desgaste.

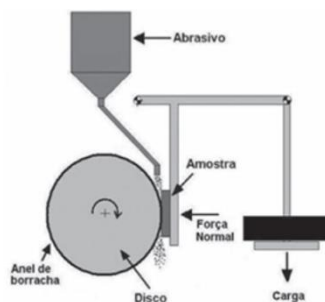


Figura 2. Diagrama esquemático do aparato de teste de roda de borracha. Adaptado de ASTM G65, 2016.

A configuração deste sistema permite a aplicação de alta carga e utilização de um contra-corpo com baixa dureza e promove o deslizamento das partículas abrasivas na interface de desgaste. Os eventos resultantes da movimentação das partículas abrasivas apresentam um forte direcionamento de acordo com o movimento do contra-corpo.

Woldman et al (2012) estudaram a influência das propriedades das partículas de areia sobre o desgaste abrasivo utilizando um equipamento para teste abrasivo de roda de borracha com areia seca. Mostrou-se que diferentes variedades de areia apresentam diferentes taxas de desgaste específico. O tamanho da partícula, a taxa de alimentação de abrasivo e sua forma não podem explicar essas diferenças separadamente. Contudo, quando se utiliza uma combinação destas propriedades de partícula, pode-se derivar uma relação entre as propriedades da areia e a abrasão que é causada.

Alguns resultados mostram que a abrasividade de partículas pode ser determinada usando o ensaio roda de borracha. Por exemplo, Fulcher et al (1983) investigaram o papel da fração volumétrica de carboneto no desenvolvimento da resistência à abrasão. A resistência à abrasão por esforço das ligas foi medida contra areia de quartzo (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) com um ensaio de abrasão de roda de borracha abrasiva seca (Rubber Wheel Abrasion Test - RWAT).

Resultados ilustrados na Fig. (3) mostram que a resistência à abrasão chegou a um valor máximo para uma fração volumétrica de carboneto intermediária próxima da composição eutética para o quartzo, enquanto que a perda de massa diminuiu monotonicamente com a fração volumétrica de carboneto para testes com o Al_2O_3 mais duro (Fulcher et al, 1983).

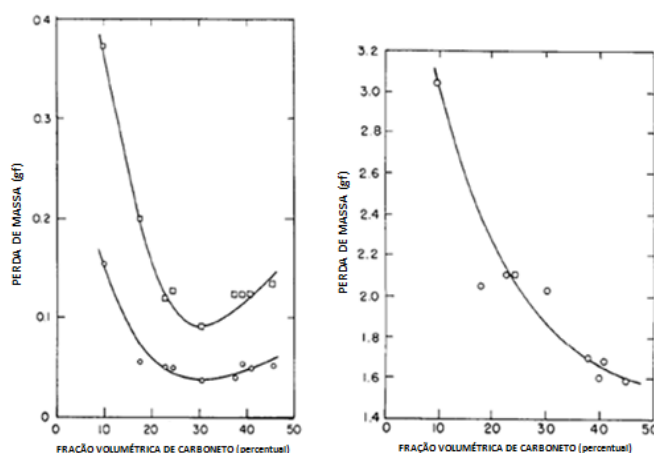


Figura 3. Perda de massa de ferro branco como função da fração volumétrica de carboneto para testes RWAT com SiO_2 e Al_2O_3 . Fulcher et al, 1983.

A dureza do abrasivo em relação à superfície desgastada é um fator importante na determinação da resistência ao desgaste, e esse fator é pelo menos parcialmente responsável pelas diferenças de comportamento do SiO_2 e do Al_2O_3 (Fulcher et al, 1983).

2.2.1 Teste de abrasão com roda de aço

O teste de abrasão com roda de aço (Steel Wheel Abrasion Test - SSWAT) apresenta um bom potencial para o controle e medição de todas as variáveis que afetam o desgaste abrasivo (Radziszewski, 2009).

Radziszewski (2009) mostrou com seus resultados que o desgaste abrasivo com roda de aço em condições secas (Steel Wheel Abrasion Test - SWAT) depende da interação entre o material da amostra, do abrasivo, da carga aplicada e da energia consumida no desgaste e ruptura do abrasivo.

Petrica et al (2013) realizaram testes de desgaste abrasivo a três corpos a partir de um método de ensaio de abrasão contínuo modificado a partir do ensaio de roda de borracha com areia seca de acordo com ASTM G65. Um dispositivo, exemplificado na Fig. (4), equipado com uma roda de aço em vez da roda de borracha foi usado para o teste de abrasão (Slurry Steel Wheel Abrasion Test - SSWAT).

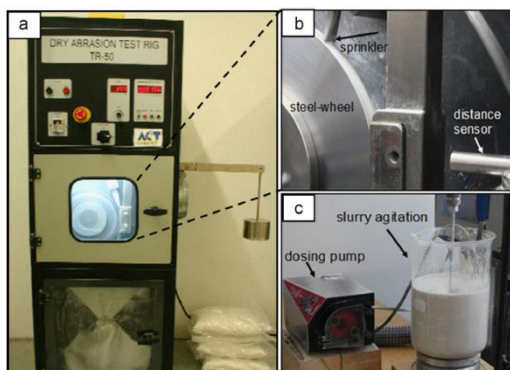


Figura 4. Equipamento para ensaio abrasivo SSWAT: (a) dispositivo; (b) câmara de testes; (c) dispositivo para adição de abrasivo. Petrica et al, 2013.

As maiores taxas de desgaste foram observadas em testes com o quartzo como abrasivo. O quartzo resultou em uma taxa de desgaste 7,5 vezes superior a do granito, que conduziu ao menor desgaste de todos os abrasivos testados, como ilustrado na Fig. (5).

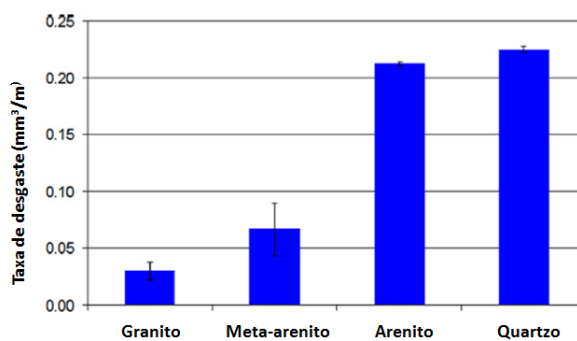


Figura 5. Taxa de desgaste para abrasão a três corpos com diferentes abrasivos. Petrica et al, 2013.

Observou-se que uma superfície fortemente deformada é formada na abrasão a três corpos com os diferentes abrasivos. Os mecanismos de desgaste, no caso do granito, onde a menor taxa de desgaste foi detectada, podem ser descritos como arranhões e ranhuras combinados com múltiplas indentações devido a partículas de granito rolantes / deslizantes. Já as ranhuras pronunciadas são causadas por partículas de quartzo duro.

A Figura (6) mostra a correlação entre o teor de quartzo equivalente e a taxa de desgaste em condições de abrasão a três corpos. O granito tem o menor valor de quartzo equivalente levando a uma menor taxa de desgaste e, além disso, a energia de desgaste específica necessária para o granito produzir desgaste é alta. Por outro lado, o arenito tem o maior valor de quartzo equivalente e produz a maior taxa de desgaste de todos os abrasivos testados. A energia de desgaste específica mostra um valor baixo, e isso faz o arenito altamente abrasivo no caso de condições a três corpos (Petrica et al, 2013).

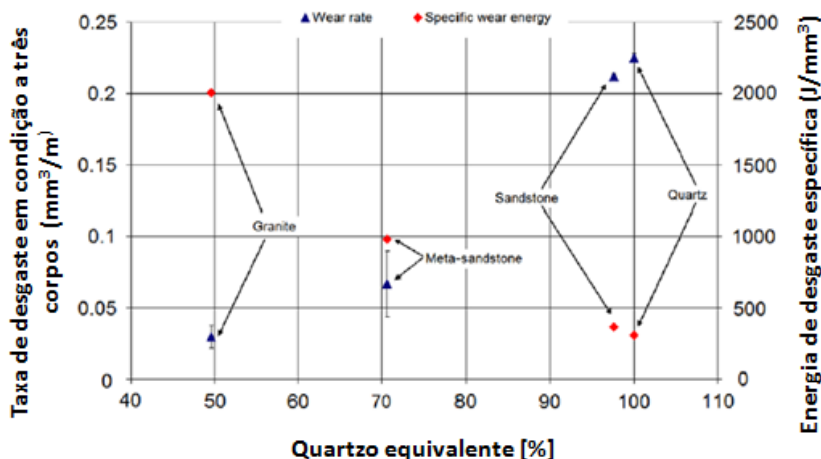


Figura 6. Relações entre taxa de desgaste, conteúdo de quartzo e energia de desgaste específica para condições de desgaste a três corpos. Petrica et al, 2013.

2.3. Ensaios de britador de mandíbulas (ASTM G81)

O ensaio em britadores de mandíbulas, normalizado pela Norma ASTM G81 (2013), determina a resistência à abrasão de materiais e simula abrasão de alta tensão sob condições de impacto de alta energia (Petrica et al, 2013).

Diferentes tipos de trituradores de mandíbula têm sido usados para testes de abrasão, e uma quantidade limitada de dados tem sido publicada. Este método de ensaio classifica os materiais e também indica diferenças na vida de desgaste para esse tipo de abrasão definido como abrasão de goivagem, como é encontrado em equipamentos de britagem e em muitas aplicações de mineração (ASTM G81, 2013).

Materiais homogêneos em sua estrutura e propriedades são os materiais de teste mais apropriados para esse teste (ASTM G81, 2013). Esta prática permite fazer uma escala de materiais em equipamentos de britagem e em algumas aplicações na mineração e movimentação de solo, pois o desgaste pode variar dramaticamente com a mudança das características (geológica, química, geométrica, mecânica) do material britado e do tipo de equipamento (Bartalini, 1999).

Resultados de Bartalini (1999) em ensaios de britador de mandíbulas mostram que a ordem crescente de “abrasividade” das rochas ensaiadas para mandíbulas fixa e móvel é: calcário → carbonatito → basalto → diabásio → granito → quartzito. Esta ordem mostra que o principal fator no desgaste das mandíbulas é o conteúdo de quartzo nas rochas britadas.

Pode-se também dividir as rochas com relação ao desgaste nos seguintes grupos:

- desgaste pequeno: ausência ou pequena presença do mineral quartzo;
- desgaste médio: teores de quartzo de 20 a 40%;
- desgaste alto: teores de quartzo elevados.

2.4. Ensaios de abrasão por impacto cíclico

Petrica et al (2013) realizaram testes de desgaste abrasivo utilizando um método de ensaio denominado teste de abrasão por impacto cíclico (Cyclic Impact Abrasion Test - CIAT) a dois corpos onde as amostras de teste são montadas em um tambor externo que gira lentamente, como representado na Fig. (7).

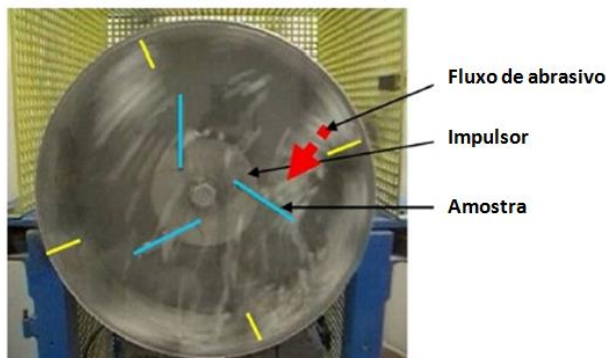


Figura 7. Equipamento utilizado para ensaio abrasivo CIAT. Petrica et al, 2013.

Resultados mostraram que alta resistência à compressão uniaxial, como no caso do granito, produz mecanismos tais como *cutting* ou *ploughing*, valores intermediários de resistência à compressão uniaxial produz mecanismos tais como a deformação plástica e sulcos de abrasão, enquanto que baixos valores de resistência à compressão uniaxial resultam na incrustação abrasiva pronunciada na superfície metálica (Petrica et al, 2013).

2.5. Ensaio de abrasividade Cerchar

O teste de abrasividade Cerchar tem se destacado como um teste amplamente utilizado e seu procedimento é estabelecido pela norma ASTM D7625, 2010. O princípio de ensaio baseia-se em um risco cantra a superfície de uma amostra de rocha rugosa em uma distância de 10mm com um pino de aço, com geometria e dureza definidas sob carga estática de 70N. O índice de abrasividade Cerchar (CAI - Cerchar- Abrasivity-Index) é calculado a partir do diâmetro do desgaste resultante medido em plano sobre o pino pela Eq. (1) (Käsling, 2010).

$$CAI = 10 * \frac{d}{c} \quad (1)$$

Onde CAI: índice de abrasividade Cerchar (-); d: diâmetro da superfície desgastada (mm), ilustrado na Fig. (8) e c: fator de correção (c=1mm).

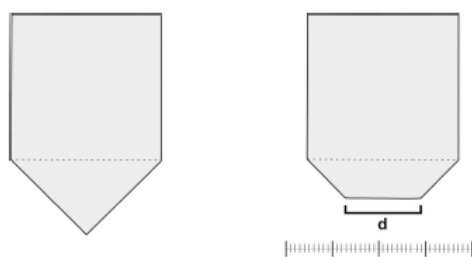


Figura 8. Esboço do pino de aço com forma retangular antes do ensaio (esquerda) e após o ensaio (direita) com o plano de desgaste d. Käsling, 2010.

2.6. Ensaios de micro abrasão

Em testes de desgaste por micro abrasão, uma carga normal força a amostra contra uma esfera na presença de uma pasta abrasiva e o desgaste é analisado com base na evolução do diâmetro da cratera em função do tempo (Gomez, 2015). Uma das principais características deste teste é a identificação dos modos de desgaste na amostra, que são normalmente classificados em abrasão por riscamento e abrasão por rolamento (Adachi et al, 2005; Trezona et al, 1999).

Vários estudos de modo de desgaste são baseados na mecânica do movimento de partículas. Mais especificamente, as cargas e restrições em uma partícula abrasiva são avaliadas a fim de compreender as condições que resultariam na sua rotação no interstício entre os dois corpos em contato (Adachi et al, 2005; Trezona et al, 1999; Williams et al, 1992).

2.6.1 Determinação da espessura de revestimentos

O ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa foi desenvolvido por Rutherford e Hutchings em 1996. Tal teste é usado principalmente para medir a espessura e a resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos finos ou camadas superficiais (Stachowiak et al, 2004) e tribômetros comerciais baseados neste método estão disponíveis (CSEM Calotest e Calowear e Plint TE-66 para micro abrasão).

Inicialmente, a finalidade desse ensaio era somente determinar a espessura de revestimentos. Atualmente, devido ao grande potencial do ensaio, o mesmo é aplicado em diversas pesquisas que envolvem o desgaste abrasivo de materiais metálicos e não metálicos recobertos ou não (Gee et al, 2005).

O teste de desgaste micro abrasivo é uma técnica promissora que tem o potencial de avaliar a resistência ao desgaste de superfícies revestidas de engenharia (Gee et al, 2005). Na indústria o mesmo é aplicado no controle de qualidade e para avaliar a espessura de revestimentos (Schiffmann et al, 2005).

O teste de abrasão em microescala tem sido cada vez mais usado para testar a resistência ao desgaste abrasivo de materiais como metais não ferrosos e suas ligas (ASTM G65, 2016; Trezona et al, 1999), aços para ferramentas (Stachowiak et al, 2004), aço carbono simples (Rutherford et al, 1997), cerâmica (Stachowiak et al, 2004), vidro (ASTM G65, 2016), polímeros (Stachowiak et al, 2004) e até mesmo compósitos restauradores dentários (Rutherford et al, 1997). Pesquisas recentes mostraram que o teste de desgaste abrasivo com esfera rotativa também é adequado para caracterizar o poder abrasivo de grãos com diferentes angularidades (Trezona et al, 1999).

Segundo Rutherford e Hutchings (1997), este método pode ser estendido para materiais recobertos, podendo os coeficientes de desgaste do substrato e do recobrimento serem calculados a partir de um único teste. Neste caso podem ser aplicados testes perfurantes ou não perfurantes, sendo que, no primeiro, o processo de desgaste é realizado até que o substrato seja exposto, possibilitando a determinação do coeficiente de desgaste do recobrimento e do substrato. Já para os testes não perfurantes a cratera de desgaste não ultrapassa o limite de espessura do filme, permitindo a avaliação da resistência ao desgaste do recobrimento sem a interferência do substrato (Schiffmann et al, 2005).

Gee et al (2005) encontraram em seus experimentos uma boa concordância entre a taxa de desgaste do revestimento para os testes perfurantes e os testes não perfurantes. Porém, para a taxa de desgaste do substrato uma ligeira diferença.

2.6.2 Determinação de taxas de desgaste por esfera rotativa

O ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa vem sendo amplamente adotado em estudos envolvendo desgaste abrasivo de materiais (Cozza, 2011). A Figura (9) ilustra, de forma esquemática, o princípio do desgaste.

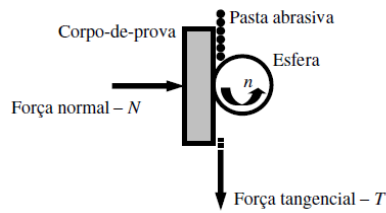


Figura 9. Representação esquemática do princípio do ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa. Cozza, 2011.

De acordo com a Fig. (9) a esfera, sob movimento de rotação, encontra-se em contato com o corpo-de-prova. Uma pasta abrasiva, geralmente composta por algum pó abrasivo e água destilada é utilizada durante a realização dos ensaios. A aplicação da força normal sobre o corpo-de-prova, o contato e o movimento relativo entre os componentes do sistema tribológico gera uma força tangencial e consequentemente uma calota esférica forma-se no corpo de prova (Cozza et al, 2009).

A partir do ensaio de desgaste por esfera rotativa são geradas calotas esféricas, também chamadas de crateras de desgaste. Em uma cratera esférica de desgaste três grandezas geométricas são geralmente analisadas: o diâmetro (d), a profundidade (h) e o volume de material removido (V). A Figura (10) exemplifica tais grandezas.

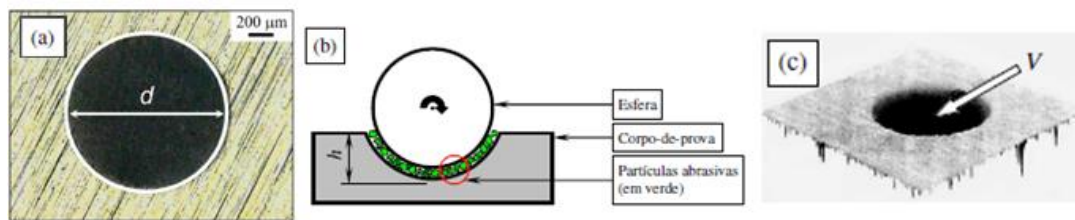


Figura 10. (a) diâmetro d ; (b) profundidade h ; (c) volume V . Cozza et al, 2009.

Um dos métodos para se medir o diâmetro d da calota é por meio da técnica chamada de microscopia ótica (MO). Já a profundidade (h) e o volume de material removido (V) podem ser calculados pelas Eq. (2) e (3) (Cozza, 2006).

$$h = 12,70 - \sqrt{161,29 - 0,25d^2} \quad (2)$$

$$V = \pi(12,7h^2 - \frac{h^3}{3}) \quad (3)$$

Unidades: h [mm], d [mm], e V [mm³].

Os ensaios podem ser conduzidos sobre força normal constante ou não-constante sobre o corpo-de-prova. Além da força normal, diversos outros parâmetros podem ser variados para análise da variação das condições de testes por esfera rotativa.

A resistência ao desgaste abrasivo depende das condições de ensaio. A taxa e os mecanismos de desgaste podem diferir significativamente com diferentes condições de teste, como velocidade de deslizamento ou carga normal aplicada (Adachi et al, 1997). O modo de desgaste pode ser alterado ajustando a carga, com a modificação das partículas abrasivas, com a quantidade de abrasivo na mistura, com a condição da superfície da esfera e com a forma e material da partícula abrasiva (Stachowiak et al, 2006).

Trezona et al (1999) estudaram o efeito da carga, da concentração de lama e do material abrasivo. Observou-se um comportamento não linear quando o volume de desgaste foi traçado como uma função da fração de volume de partículas abrasivas. Máximos no volume de desgaste foram observados em curvas obtidas para diferentes cargas normais. Além disso, com baixas concentrações de lama, foram obtidos volumes de desgaste semelhantes para três cargas normais aplicadas e uma diminuição contínua no volume de desgaste com a diminuição da fração de volume de partículas abrasivas foi observada.

2.6.3. Determinação da abrasividade usando micro-abrasão

A morfologia da superfície de desgaste é também afetada pela angularidade das partículas e pelas propriedades dos materiais das amostras de desgaste.

Stachowiak et al (2001) mostraram com testes de esfera sobre placa uma correlação entre as taxas de desgaste e a angularidade das partículas. Partículas arredondadas geraram crateras redondas e ranhuras lisas, enquanto partículas angulares produziram recortes afiados e ranhuras de corte estreitas.

Resultados de Stachowiak et al (2004) com quatro tipos diferentes de partículas abrasivas grandes para ensaios de desgaste por esfera rotativa (vidro, areia de sílica, quartzo e alumina) sugeriram que o desgaste depende da forma das partículas abrasivas, da dureza e da microestrutura do material de desgaste.

Stachowiak et al (2006) verificaram através de testes com as mesmas partículas abrasivas que a rugosidade da superfície da esfera afeta significativamente as taxas e os mecanismos de desgaste das amostras metálicas. A rugosidade superficial da esfera aumentou de forma constante com o tempo de ensaio e foi principalmente afetada pela angularidade das partículas abrasivas, onde partículas mais angulares geraram maior rugosidade da superfície da esfera. Além disso, as partículas de dureza e tamanho semelhantes, mas de angularidade diferente (areia de sílica e quartzo) podem gerar diferentes morfologias de superfície de desgaste nos materiais.

Em testes de micro-abrasão partículas finas abrasivas também causam alguns danos às esferas rotativas, entretanto este dano é geralmente negligenciado, uma vez que parece não afetar o comportamento de desgaste esperado (Rutherford et al, 1997).

Logo, pode-se avaliar a abrasividade de diferentes partículas abrasivas através de ensaios de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa a fim de encontrar possíveis alternativas de abrasivos com resultados de remoção de material semelhantes, a partir da utilização de partículas de abrasivos com comportamento semelhante e com um melhor custo-benefício. Tal ensaio permite identificar os modos de desgaste, além da possibilidade de combinação de diversas variáveis de ensaio para avaliação da abrasividade.

Após a investigação dos métodos de teste de abrasão anteriores, uma tabela de resumo foi criada para comparar as vantagens, limitações e parâmetros que podem ser correlacionados com os dados obtidos por cada teste. A Tabela (1) apresenta um resumo dos ensaios investigados.

Tabela 1. Resumo dos ensaios para medir abrasividade.

Método	Dimensão das partículas	Vantagens	Limitações
Teste de Miller	Micrométrica	Utiliza material de desgaste standard. Permite variação de morfologia das partículas. Permite variação de concentração da lama. Diferentes condições de abrasão em altas tensões podem ser simuladas.	Variabilidade da força de contato.
Teste SAR	Micrométrica	Permite variação de morfologia das partículas. Permite variação de concentração da lama. Diferentes condições de abrasão em altas tensões podem ser simuladas.	Não há apenas um material standard para abrasividade. Variabilidade da força de contato.
Ensaio de roda de borracha e de roda de aço	Micrométrica	Permite variação de morfologia das partículas. Permite variação de concentração da lama. Roda de borracha pode apresentar valores de energia específica. Roda de aço apresenta potencial para o controle e medição de diversas variáveis que afetam a abrasividade.	Não há indicação de material standard para abrasividade. Não avalia o efeito da mineralogia das partículas.
Ensaio de britador de mandíbulas	Milimétrica	Permite variação de morfologia e mineralogia das partículas. Simula abrasão de alta tensão sob condições de impacto de alta energia. Mostra a abrasividade de rochas para mandíbulas fixa e móvel.	Não há indicação de material standard para abrasividade. Mecanismos de desgaste não são os mesmos para as mandíbulas fixas e móveis.
Ensaio de abrasão por impacto cíclico	Milimétrica	Utiliza material de desgaste standard. Permite variação na velocidade de alimentação das partículas. Permite variação de morfologia e mineralogia das partículas. O abrasivo entra em contato direto com as superfícies de desgaste com uma energia de impacto definida.	Abrasivo pequeno não é ideal para simulação da situação real.
Ensaio de abrasividade Cerchar	Milimétrica	Utiliza material de desgaste standard. Permite variação de morfologia e mineralogia das partículas.	Indicador qualitativo de abrasividade.
Ensaio de micro abrasão	Micrométrica	Permite variação de morfologia das partículas. Permite variação de concentração da lama. Permite variação de velocidade de alimentação das partículas.	Não há indicação de material standard para abrasividade. Há possibilidade de diversos mecanismos de desgaste atuarem.

Percebe-se que cada ensaio de desgaste apresentado apresenta suas vantagens e limitações. O ensaio de micro abrasão pode ser considerado o ensaio com maior possibilidade de variações nas principais variáveis de controle, quais sejam: material de referência para o corpo de ensaio, morfologia e mineralogia das partículas abrasivas e variação de concentração da lama. Entretanto, deve ser destacado que um trabalho adicional para se definir um material de referência seria ideal quando tratamos especificamente da abrasividade das partículas, pois quando se mede o que a partícula promove de remoção de material ter um material de referência seria uma vantagem.

Ensaio na faixa micrométrica de tamanhos não permitiriam estudos com variação mineralógica. Quando a partícula está na faixa micrométrica, há possibilidade que os minerais tenham sido liberados pelo processo de redução do tamanho, o que faz com não seja mais possível o controle da fração de constituintes. Entretanto, Stachowiak et al (2004) mostrou em ensaios de micro abrasão por esfera rotativa com partículas na escala milimétrica, que apesar do

tamanho das partículas abrasivas, o desgaste também é afetado pela forma da partícula e pelas propriedades dos materiais de amostras de desgaste.

3. CONCLUSÕES

O objetivo deste estudo foi informar a comunidade de engenharia futuras pesquisas potenciais para a abrasão de partículas e sugerir possíveis métodos para obter dados. As seguintes conclusões podem ser feitas a partir da pesquisa e revisão da literatura realizada neste artigo:

- Abrasividade pode ser estudada utilizando equipamentos construídos para diferentes materiais de abrasivos;
- Correlações entre métodos para verificar a abrasividade estão disponíveis;
- Diferentes técnicas de abrasão podem ser aplicadas à diferentes abrasivos;
- Diferentes variáveis que afetam a resistência à abrasão devem ser verificadas para diferentes métodos de medir abrasividade. Como exemplo, para os ensaios de micro abrasão a angularidade das partículas e o material de desgaste são os fatores primordiais;
- Ensaios de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa podem ser muito úteis para verificar a abrasividade de diferentes partículas.

À medida que a tecnologia avança e novas idéias são introduzidas para a comunidade de engenharia, a resistência à abrasão de diferentes abrasivos será mais fácil e precisamente medida. As propriedades abrasivas podem fornecer informações valiosas que podem ser usadas com para futuras correlações em diferentes estudos.

4. REFERÊNCIAS

- Adachi, K., Hutchings, I.M. Sensitivity of wear rates in the micro-scale abrasion test to test conditions and material hardness, *Wear* 258 (2005) 318–321.
- American Society For Testing Materials. Standard Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using the CERCHAR Method D7625-10 Annual Book of ASTM Standards, 2010.
- American Society For Testing Materials. Standard Test Method for Determination of Slurry Abrasivity (Miller Number) and Slurry Abrasion Response of Materials (SAR Number) G75-15 Annual Book of ASTM Standards, 2015.
- American Society For Testing Materials. Standard Test Method for Jaw Crusher Gouging Abrasion Test. G81 Annual Book of ASTM Standards, 2013.
- American Society For Testing Materials. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. G65-16 Annual Book of ASTM Standards, 2016.
- Bartalini, M.M. Desgaste abrasivo em britadores de mandíbulas. Monografia. Universidade de São Paulo - Engenharia Industrial Mecânica. São Paulo, 1999.
- Coseglio, M. S. D. R., Moreira, P. P., Procópio, H. L., Pintaude, G. Analysis of the efficiency of hydroerosive grinding without renewal of abrasive particles. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 138(3), 031007, 2016.
- Cozza, R.C. Estudo do desgaste e atrito em ensaios micro-abrasivos por esfera rotativa fixa em condições de força normal constante e pressão constante. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil, 2011. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/>.
- Cozza, R.C. Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste microabrasivo. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil, 2006. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/>.
- Cozza, R.C., Tanaka, D.K., Souza, R.M. Friction coefficient and abrasive wear modes in ball-cratering tests conducted at constant normal force and constant pressure – preliminary results. *Wear* 267 (2009) 61-70.
- Fulcher, J.K., Kosel, T.H., Fiore, N.F. The effect of carbide volume fraction on the low stress abrasion resistance of high Cr-Mo white cast irons, *Wear* 84 (1983) 313–325.
- Gee, M.G., Gant, A.J., Hutchings, I.M, Kusano, Y., Schiffmann, K., Acker, K.V., Poulat, S., Gachon, Y., Stebut, J.V., Hatto, P., Plint, G. Results from an interlaboratory exercise to validate the micro-scale abrasion test, *Wear* 259 (2005) 27-35
- Gomez, V.A.O., Macedo, M.C.S., Souza, R.M., Scandian, C. Effect of abrasive particle size distribution on the wear rate and wear mode in micro-scale abrasive wear tests, *Wear* 328-329 (2015) 563–568.
- Gov, K., Eyercioglu, O. Effects of abrasive types on the surface integrity of abrasive-flow-machined surfaces, *Journal of Engineering Manufacture* (2016) 1-10.
- Hutchings, I.M. Tribology – friction and wear of engineering materials. Edward Arnold, A Division of Hodder Headline PLC; Londres, 1992.
- Käsling, H., Thuro, K. Determining rock abrasivity in the laboratory. Conference Paper. June 2010.
- Komanduri, R., Lucca, D.A., Tani, Y. Technological advances in fine abrasive processes. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, v. 46, n. 2, p. 545-596, 1997.

- Petrica, M., Badisch, E., Peinsitt, T. Abrasive wear mechanisms and their relation to rock properties, *Wear* 308 (2013) 86–94.
- Philpotts, C.J., Weader, E., Joiner, A. The measurement in vitro of enamel and dentine wear by toothpastes of different abrasivity. *International dental journal*, v. 55, n. S3, p. 183-187, 2005.
- Plinninger, R.J., Restner, U. Abrasiveness testing, quo vadis?—a commented overview of abrasiveness testing methods. *Geomechanics and Tunnelling*, v. 1, n. 1, p. 61-70, 2008.
- Radziszewski, P. The steel wheel abrasion test (SWAT): A tool to study wear, friction and ore breakage in the mining industry, *Wear* 267 (2009) 92–98.
- Rutherford, K.L., Hutchings, I.M. Theory and application of a micro-scale abrasive wear test, *Elsevier Science S.A.* 25, n. 2 (1997) 250-260.
- Schiffmann, K.I.; Bethke, R.; Kristen, N. Analysis of perforating and non-perforating micro-scale abrasion tests on coated substrates. *Surface and Coatings Technology* 200 (2005) 2348-2357.
- Stachowiak, G.B., Stachowiak, G.W., Brandt, J.M. Ball-cratering abrasion tests with large abrasive particles, *Tribology International* 39 (2006) 1-11.
- Stachowiak, G.B., Stachowiak, G.W. The effects of particle characteristics on three-body abrasive wear, *Wear* 249 (2001) 201-207.
- Stachowiak, G.B., Stachowiak, G.W. Wear mechanisms in ball-cratering tests with large abrasive particles, *Wear* 256 (2004) 600–607.
- Trezona, R. I., Allsopp, D. N., Hutchings, I. M. Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test, *Wear* 229 (1999) 205-214.
- Ureel, S.D., Momayez, M. An Investigation of the Present and Future Testing Methods of Rock Abrasion Resistance. *International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing*, (2014) 10-19.
- Williams, J. A. and Hyncica, A. M. Mechanisms of abrasive wear in lubricated contacts, *Wear* 152 (1992) 57-74.
- Woldman, M., Heide, E.V.D., Schipper, D.J., Tinga, T., Masen, M.A. Investigating the influence of sand particle properties on abrasive wear behavior, *Wear* 294–295 (2012) 419–426.

A REVISION OF TESTING METHODS TO MEASURE ABRASIVITY OF HARD PARTICLES

Tiago Alexandre Rosso, tiagoarosso@hotmail.com¹

Giuseppe Pintaúde, pintaude@utfpr.edu.br¹

Ane Cheila Rovani, acrovani@gmail.com¹

¹Federal Technological University of Paraná, UTFPR, Sete de Setembro Avenue, 3165, Rebouças – CEP 80230-901, Curitiba - PR

Abstract: Material abrasion can be used as a means of material removal by machining, or it may be an unwanted material removal mechanism associated with productive processes, such as ore comminution. The removal capacity may be associated with variations of abrasive concentration, geometry, hardness and particle size distribution in the abrasive fluid. Therefore, a better understanding of particle abrasivity is necessary for a better characterization of the modes and mechanisms in the process. In the present article, a review of the following tests to measure abrasivity is presented: rubber wheel abrasion test (ASTM G65), test method for determination of slurry abrasivity - Miller Number (ASTM G75) and micro abrasion, in the micrometric scales, and jaw crusher abrasion test (ASTM G81), cyclic impact abrasion test and Cerchar abrasivity test, in the millimetric particle size scale. In particular, future applications of abrasivity determination using the micro abrasion test are presented in greater detail.

Keywords: abrasivity, abrasive wear, material removal, hard particles.