

AVALIAÇÃO DO DESGASTE ABRASIVO A SECO DE MATERIAIS DE ELEVADA DUREZA¹

Artur Frederico Fonseca da Cruz²
Marcelo Renney Alves de Freitas²
Adelci Menezes de Oliveira³
João Telésforo Nóbrega de Medeiros⁴

Resumo

A redução de custos de produção e manutenção em empresas de mineração e petrolíferas associa-se ao desenvolvimento tecnológico e à compreensão da Tribologia dos sistemas e materiais envolvidos em cada processo. Há uma relação entre o desgaste abrasivo e a adequação ao uso de equipamentos de desmonte mecânico e carga de minério e materiais associados. Isto motivou o desenvolvimento de uma bancada para auxiliar na seleção e avaliação do desgaste de Ferramentas de Penetração de Solo. Os resultados obtidos em laboratório poderão ser úteis, por exemplo, na programação de paradas para manutenção dos equipamentos. Para isso, foram medidos a variação de massa, a dureza do material, a temperatura próximo ao contato, a potência consumida pelo motor e a rugosidade dos corpos de prova. Os ensaios evidenciaram a influência da dureza do metal no desgaste, além de exporem uma tendência à convergência dos valores de rugosidade média Ra na superfície dos corpos de prova. A potência consumida pelo motor, a temperatura próxima ao contato e os mecanismos de dano nas FPS demonstraram ser associados, confirmando a validade do método e a utilidade da bancada, sua viabilidade técnica e econômica. Discute-se a necessidade das repetições dos ensaios e da adoção de outros parâmetros de medida indireta dos efeitos do desgaste abrasivo.

Palavras-chave: Tribologia; Desgaste abrasivo; Ferramentas de penetração de solo.

EVALUATION OF ABRASIVE DRY SLIDING WEAR IN MATERIALS WITH HIGH HARDNESS

Abstract

The cost reduction of process and maintenance in the mining and petroleum industries is linked to the technological development and the Tribological comprehension of systems and materials involved in these processes. There is a relation between the abrasive wear and the fitness-in- service of equipments used for mechanical dismantling and ore and associated materials loading. This motivation led to the development of a bank test rig for aid in the selection and evaluation of Ground Engaging Tools. The results obtained in Laboratory can be useful, for example, in the scheduling of downtimes for maintenance of equipments. To quantify the wear and its effects were measured the mass variation, the hardness of the material, the temperature near to the contact, the power consumed by engine and the roughness of the specimens. The testings evidenced the influence of hardness on the wear of the metal and exhibited a trend in the convergence of the values of average roughness Ra in the surface of the specimens. It has observed that there was an association between the power consumed by driver electric motor, the temperature next to contact and the wear mechanisms of Ground Engaging Tools, confirming the method and test rig usefulness and their technical and economic feasibility. The testing repetitions and the measurement of additional parameters are discussed and related to the effects of abrasive wear.

Key words: Tribology; Abrasive wear; Ground engaging tools.

¹ Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engº, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – UFRN;

³ Engº Msc., Petrobras;

⁴ Prof. Dr., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – UFRN

1 INTRODUÇÃO

A dinâmica atual da economia do mundo tem mostrado a fragilidade, por um lado, dos mal preparados estrategicamente, e a estabilidade, por outro, dos que são bons estrategistas tecnológicos, científicos e econômicos. Está cada vez mais claro que o preparo necessário para o enfrentamento de grandes crises e oportunidades passa pelas vias tecnológicas, científicas e econômicas, que cada vez se mostram mais visivelmente associadas.

Nas indústrias de mineração e petrolífera de perfuração de novos poços, os custos com reparo e substituição de peças desgastadas acumulam gastos e cenários que, não sendo geridos adequadamente, podem contribuir para danos catastróficos e redução dos lucros dos acionistas, inviabilizando projetos.

Operações de penetração do solo, movimentações de terra, processamento e transporte de minério são fontes inesgotáveis e recorrentes de danos à superfície e subsuperfície de ferramentas como brocas para sondagem e desmonte, lâminas e pontas de tratores escarificadores, dentes da caçamba de escavadeiras, subconjuntos essenciais de britadores, carga moedora e revestimento interno de moinhos, correias transportadoras, dentre outras.

Estima-se que o desgaste abrasivo em maquinário pesado é responsável por 52% do efeito final da combinação de mecanismos de desgaste⁽¹⁾ e que o custo do desgaste abrasivo (dissipação de energia, manutenção, parada na produção por danos em equipamentos) é alto e está estimado em uma média de 1% a 4% do produto interno bruto de uma nação industrializada.⁽²⁾

Com o objetivo de amenizar os gastos com o desgaste abrasivo, a Tribologia, ciência que estuda o atrito, o desgaste, a lubrificação, a integridade estrutural e vida em serviço de peças que se contactam com movimento relativo entre si e são solicitadas por cargas, tem pesquisado os fatores que influenciam no desgaste, como parâmetros de material (composição, tamanho do grão, módulo de elasticidade, condutividade térmica, dureza, resistência mecânica, dentre outros), parâmetros de projeto (função, forma, carregamento, tipo de movimento relativo, textura superficial, vibração, vida em serviço, dentre outros) e parâmetros concernentes ao meio ambiente (temperatura, ruído, contaminação, umidade, atmosfera, dentre outros).

Em máquinas e equipamentos utilizados na mineração, o atrito de deslizamento entre sólidos em contatos macroscópicos metal-cerâmica e seus desdobramentos micro e nanométricos é o cerne das estruturas dissipativas, às quais se vinculam o desgaste de peças-chave e o desperdício de energia investido em cada uma das etapas de processo. Assim, há necessidade de uma compreensão científica da Tribologia das Ferramentas de Penetração de Solo (FPS), de modo que o monitoramento, medição e/ou controle de suas variáveis possa ser associado à produção, à predição de falhas, à gestão eficiente da manutenção, evitando-se assim paradas não programadas e estoques desnecessários de peças sobressalentes.

Este trabalho integra um estudo exploratório sobre a construção de uma bancada experimental para implantação de um método, em laboratório, de avaliação de aços utilizados em FPS. Para isso, construiu-se e adaptou-se uma bancada clássica para ensaios de abrasão com roda de borracha, admitindo-se ser a abrasão o principal mecanismo de desgaste dos dentes de escavadeiras durante a lavra.

O desgaste abrasivo está presente sempre que corpos em contato atritam-se em movimento relativo. Geralmente, tais corpos possuem propriedades mecânicas

diferentes, geram danos uns aos outros, os mais duros nos mais macios, de imediato, e os mais macios nos mais duros, no longo prazo – como um piso cerâmico de uma estação de metrô, que se desgasta após n pegadas. Quando o contato existe apenas entre duas superfícies, o desgaste denomina-se desgaste abrasivo a dois corpos; quando se intercede às duas superfícies um terceiro sólido, denomina-se desgaste abrasivo a três corpos. Neste caso, a pressão de contato de Hertz, p_c , intensifica-se e há uma tendência à indentação^(2,3) ($p_c/k > 3$, onde k =limite de escoamento no cisalhamento) ou aderência desse terceiro corpo, em um mecanismo de dano em que sua dureza relativa e índice de plasticidade assumem papéis decisivos no mecanismo de desgaste.

Existem formas que identificam a olho nu, ou com a necessidade de lentes ópticas de ampliação, o tipo de desgaste ao qual o material foi submetido. Estas se subdividem em função de propriedades dos materiais e das condições aos quais estão submetidos durante o desgaste, entre elas estão o micro-sulcamento, o micro-corte, a formação de proa, a micro-fadiga e o micro-lascamento.^(2,3)

A forma mais severa do desgaste abrasivo para materiais dúteis é o micro-corte ($p_c/k > 3$). Durante esse processo, a partícula abrasiva remove um cavaco muito parecido com os formados no processo de usinagem. Isto resulta na remoção de material e muito pouco deslocamento ao longo da ranhura. Para uma partícula abrasiva afiada, existe um ângulo crítico a partir do qual ocorre a transição do processo de sulcamento para o de corte. O valor desse ângulo depende essencialmente do material da superfície desgastada.^(2,3)

Num dente de escavadeira, por exemplo, convém destacar o desgaste abrasivo (a) a três corpos quando, entre a superfície da face externa do dente e a do solo existem partículas abrasivas de areia ou rocha, e (b) a dois corpos, decorrente do contato entre a superfície interna dos dentes e a do material a ser basculado.

Numa bancada de ensaio abrasivo entre uma roda de borracha, partículas abrasivas e um metal prevalece o contato metal-borracha e o dano é multiplicado em função da adição do material óxido particulado entre as superfícies em contato.

O coeficiente de atrito entre polímeros e metais em contato por deslizamento normalmente está entre 0,1 e 0,5, no entanto, estes variam muito em função da carga normal aplicada, da velocidade de deslizamento, da temperatura resultante do contato, e também do acabamento superficial e da dureza do metal utilizado como contra-corpo.⁽³⁾

É observado experimentalmente que uma partícula abrasiva de qualquer forma superficial causará riscos por deformação plástica apenas se a razão entre a sua dureza e a dureza do metal for maior que 1,2. A sílica (quartzo) é o contaminante abrasivo mais comum encontrado na natureza, com dureza média que pode variar entre 750 HV e 1200 HV, enquanto a fase martensítica de um aço temperado pode variar entre 500 HV e 1.000 HV mostrando-se, portanto um material vulnerável ao desgaste abrasivo por este agente.⁽³⁾

Na indústria de produção de materiais e equipamentos resistentes ao desgaste abrasivo, utiliza-se o método padronizado pela norma ASTM G-65, que consiste em submeter um corpo-de-prova (CP) de materiais com alta resistência à abrasão, ao deslizamento contra uma roda de borracha e entre as superfícies é adicionado um fluxo contínuo de areia seca como partículas abrasivas, possibilitando em seguida, através de medidas de perda de massa a quantificação do desgaste.

Utilizando uma tendência mundial do reuso de materiais para diminuição do impacto ambiental, o Grupo de Estudos de Tribologia da Universidade Federal do

Rio Grande do Norte tem a filosofia de desenvolver bancadas experimentais a partir de equipamentos ou materiais descartados das suas finalidades reais, que realizem-se ensaios acelerados simulando ou auxiliando na resolução de problemas cotidianos industriais, físicos ou sociais.

Partindo dessa premissa, foi desenvolvida uma bancada experimental de baixo custo para a avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de materiais de elevada dureza.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 A Bancada

Com um procedimento experimental similar ao da norma ASTM G-65, adaptando-se os corpos de prova deste estudo e implementando-se o registro de outros parâmetros para que a bancada possa fornecer uma avaliação mais completa, desde a resistência a abrasão do material ao às conseqüências do desgaste abrasivo para o sistema como um todo.

Para a montagem da bancada (Figura 1) foi utilizada a estrutura de uma incubadora hospitalar para a câmara de ensaios, uma cantoneira com um sistema de garras para fixação do material a ser ensaiado, uma roda de borracha comercial montada em um eixo de bicicleta com rolamentos e uma polia adaptada para a transmissão de força por correia de uma motor de máquina de lavar roupas. Para que houvesse o controle de velocidade o motor foi acoplado a um potenciômetro, que possibilita a variação de tensão no motor. Como reservatório do elemento abrasivo foi utilizado um recipiente de 10 L de água mineral com um sistema de torneira para controle do fluxo de abrasivo, e um sistema de tubulação no interior da bancada para a captação das partículas.

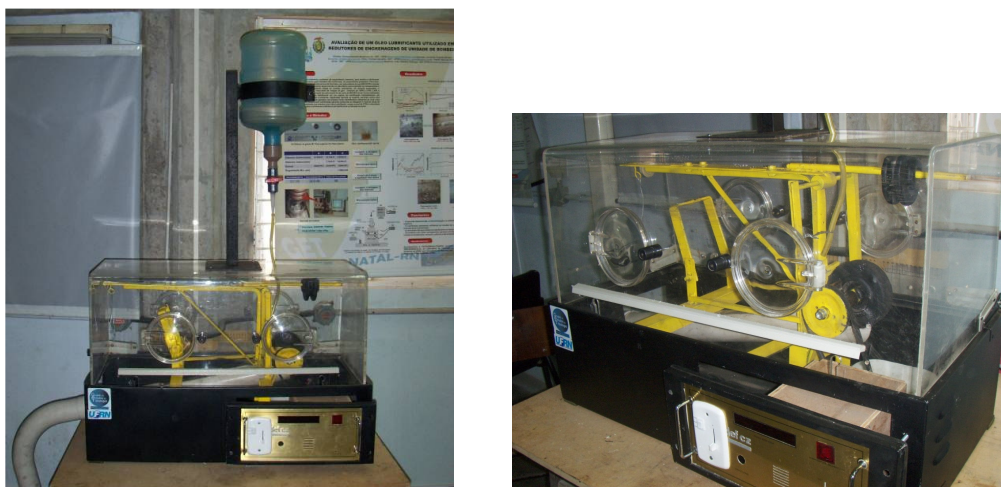


Figura 1. a) vista frontal da bancada e b) vista em perspectiva.

2.2 O Procedimento de Ensaio

Promove-se o deslizamento de uma roda de borracha contra um corpo-de-prova metálico, confeccionado a partir do seccionamento de um dente de escavadeira, submetido a uma carga normal conhecida e à velocidade média de deslizamento controlada em torno de 1.250 rpm, já que esta varia durante o ensaio em função do contato metal-material abrasivo-borracha.

Um aparato coleta a areia usada – que não retorna ao reservatório - para que possam ser armazenadas amostras do abrasivo para posterior análise.

Foram realizados ensaios variando-se o tempo, conseqüentemente a distância de deslizamento. Durante os ensaios foram tomadas medidas de temperatura próxima (a 10 mm do contato roda de borracha-CP) ao contato, temperatura ambiente e potência consumida pelo motor, sendo estas coletadas por computador. O monitoramento de velocidade média foi realizado *off-line*, em intervalos de tempo pré-definidos (Figura 2).

Foram realizados três ensaios com duração de 10 minutos, 20 minutos e 30 minutos, respectivamente, em três seções distintas do CP01 (extraída do substrato do material) e em função da perda de massa, escolheu-se o de maior severidade para que fossem repetidos no CP02 (amostra original da superfície da peça).

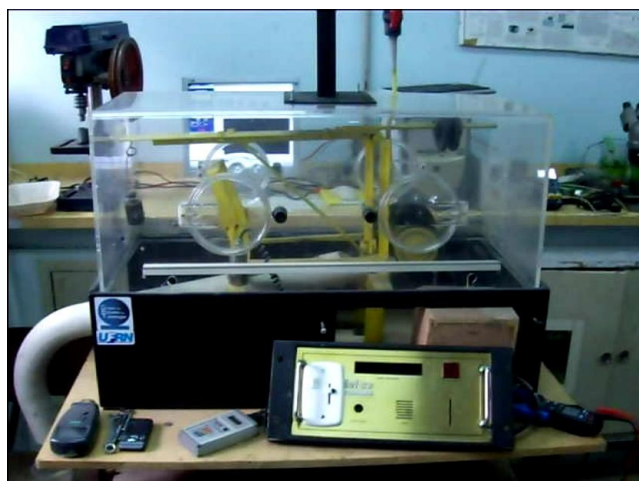


Figura 2. Bancada instrumentada durante ensaio.

2.3. Corpos de Prova, Abrasivo e Roda de Borracha

Para serem submetidos aos ensaios foram seccionados corpos de prova de um dente de escavadeira comercial utilizando uma serra de fita industrial com fluido refrigerante, tendo o cuidado para garantir a integridade das propriedades físicas originais do material, para que pudessem ser ensaiadas a superfície do substrato do material (CP01) e a superfície externa original (CP02), de dimensões 20 x 85 x 10 mm e 20 x 80 x 10 mm respectivamente, e dureza de $41,7 \pm 3,4$ HRC no CP01 e $38,6 \pm 6,6$ HRC no CP02, conforme ilustra a figura 03. A superfície interna da amostra foi lixada em lixa de grana #400 para haver uma uniformização da rugosidade, onde esta apresentou valor médio de $R_a = 0,09 \pm 0,03$ μm antes dos ensaios.

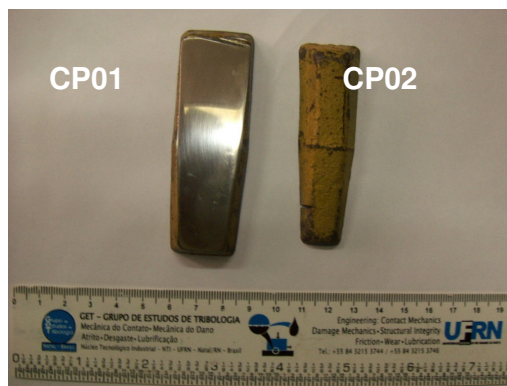


Figura 3. Corpos de prova para ensaios de abrasão.

Como material abrasivo particulado foi utilizada areia seca, selecionando-se por peneiramento o material que passou na peneira com abertura de 0,420 mm (P46, ISO 86) e ficou retido na peneira com abertura de 0,297 mm (P60, ISO 86). Durante cada ensaio, foi utilizada uma vazão média de 60 g/min de abrasivo no contato metal-borracha.

A roda de borracha com dureza média na direção axial de 95 ± 1 Shore A, superfície não utilizada durante o deslizamento, enquanto a direção circunferencial apresentou medidas variadas de dureza, numa média de 86 ± 4 Shore A. Seu diâmetro de 120 mm oferecia, a cada revolução completa, uma distância de deslizamento de 0,378 m.

2.4 Parâmetros e Equipamentos de Medição

Como parâmetro para caracterizar o desgaste foi utilizada a perda de massa, com a medição antes e depois dos ensaios, em uma balança analítica Shimadzu AY220 com resolução de 0,0001g.

As informações de velocidade de deslizamento eram verificadas a cada dois minutos com um tacômetro digital.

Importantes contribuições são adotadas para caracterizar os efeitos do desgaste abrasivo, são elas a medição das temperaturas na região próximo ao contato e a temperatura ambiente, utilizando dois termopares tipo K ligado a um medidor de temperatura digital com resolução de $0,1^\circ\text{C}$ e interface com o computador, tendo a finalidade de relacionar tais dados com os dados de potência consumida pelo motor, que foi capitado com auxílio de um medidor de potência com resolução de 0,1 W e interface para o computador, ambas as medições, temperaturas e potência, foram registradas a uma taxa de 30 pontos por minuto.

No tocante à caracterização da superfície da amostra foi utilizado um rugosímetro portátil Taylor Robson e foram feitas imagens antes e depois utilizando um microscópio óptico DMI PRIME suportado com um sistema de aquisição de imagens.

3 RESULTADOS

3.1 Desgaste

Para quantificar o desgaste utilizou-se a medida de massa do CP antes e após cada ensaio, aliadas a estas, imagens de Microscopia Óptica. A Figura 4 e a Figura 5 mostram as imagens dos CP e os identifica de acordo com a região e o

tempo de ensaio, e a Tabela 1 expõe os resultados de perda e massa e suas porcentagens em relação à sua massa antes do ensaio.

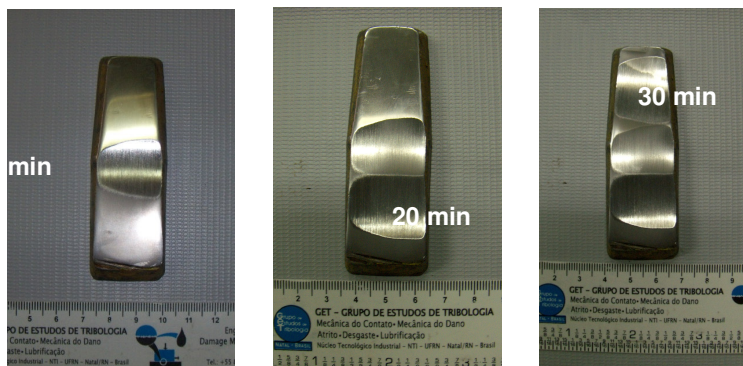


Figura 4. CP01 **a)** região do primeiro ensaio com o tempo de 10 minutos; **b)** região do segundo ensaio com o tempo de 20 minutos; **c)** região do terceiro ensaio com o tempo de 30 minutos.

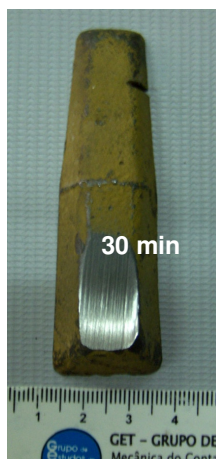


Figura 5. CP02 submetido ao ensaio com o tempo de 30 min.

Tabela 1. Informações sobre a quantificação do desgaste

Tempo	Medidas	CP01	CP02
10 min.	Perda de Massa	1,47g	
	% em massa	1,01%	
20 min.	Perda de Massa	1,95g	
	% em massa	1,35%	
30 min.	Perda de Massa	2,55g	1,61g
	% em massa	1,79%	1,91%

Na roda de borracha foram realizadas medidas de dureza na direção axial (não há contato durante os ensaios) e na direção circunferencial (ao longo da superfície em contato durante os ensaios) e apresentaram valores de dureza de 95 ± 1 Shore A e 86 ± 4 Shore A, respectivamente.

Após a realização dos ensaios, foram medidas as rugosidades no interior das marcas de desgaste e os resultados estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2. Comparação dos resultados de rugosidade média

Corpo de Prova	Tempo	Ra Antes	Ra depois
CP01	10 min	0,09 ± 0,03µm	1,92 ± 0,13µm
	20 min		1,84 ± 0,13µm
	30 min		1,66 ± 0,20µm
CP02	30 min	6,33 ± 1,73 µm	2,68 ± 0,55µm

A seguir, nos gráficos da Figuras 6, de a) a d) estão expostos os valores de Potência Consumida em Watts e Temperaturas próximo ao contato de cada ensaio, e os gráficos das Figura 7 a) e b) estão comparadas as Potências e Diferenças de Temperaturas dos ensaios entre si.

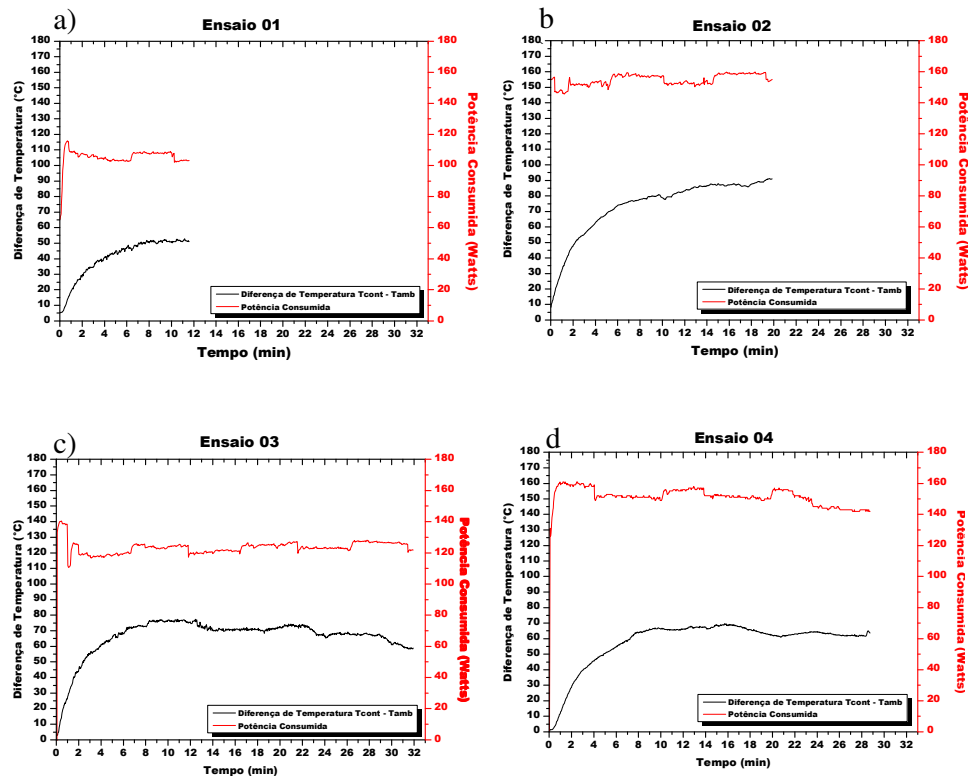


Figura 6. a) Ensaio 01 de 10 min no CP01; b) Ensaio 02 de 20 min no CP01; c) Ensaio 03 de 30 min no CP01; d) Ensaio 04 de 30 min no CP02.

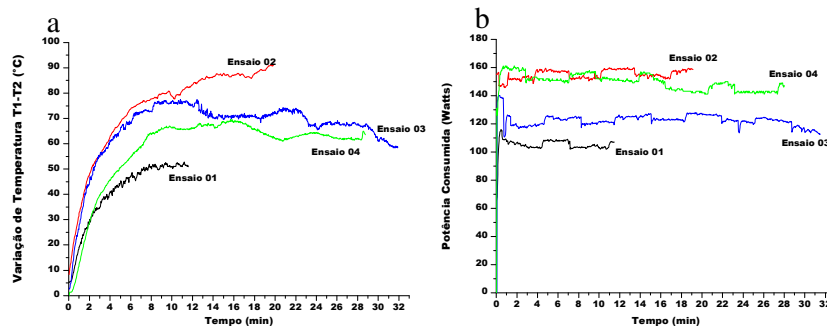


Figura 7. a) Comparação entre Temperaturas dos ensaios; b) Comparação entre Potências consumidas nos ensaios.

As Figuras 8 (a), (b), (c), (d) apresentam as fotografias obtidas por Microscopia Óptica (100X) das superfícies do CP01 antes (a), após o ensaio de 10 min (b), após o ensaio de 20 min (c) e após o ensaio de 30 min (d).

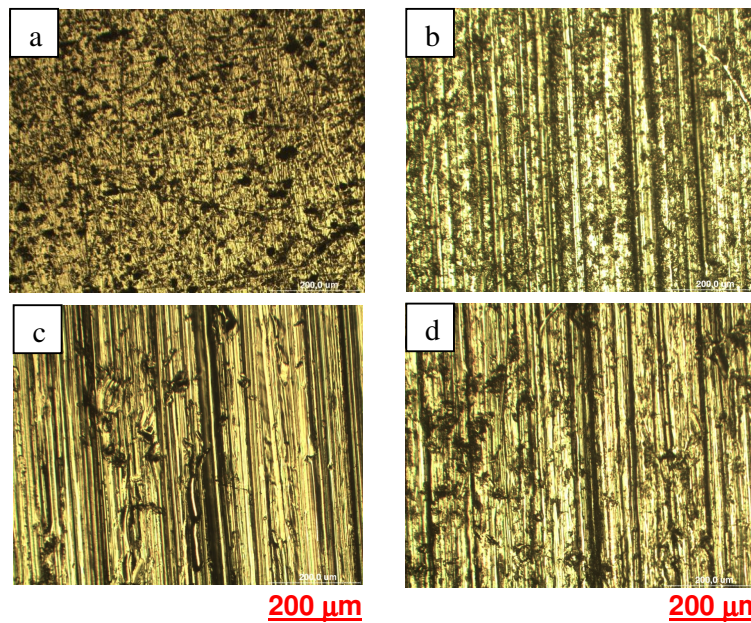


Figura 8. a) Antes; b) Após 10 min; c) Após 20 min e d) Após 30 min.

Na Figura 9 é mostrada a microscopia óptica da superfície do CP02 após o ensaio de 30 minutos. A imagem da superfície antes não foi possível de ser capturada em função do acabamento da superfície original da FPS.

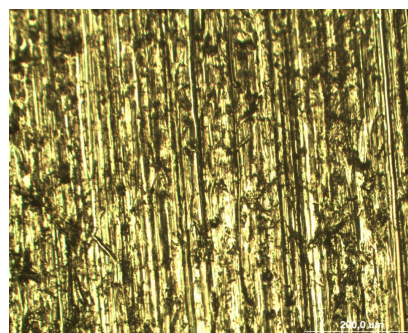


Figura 9. Microscopia da superfície do CP02 após o ensaio de 30 minutos.

Na análise microscópica comparativa entre a granulometria da areia antes e depois dos ensaios percebeu-se um cavaco (debri) metálico da amostra ensaiada, evidenciando o mecanismo de desgaste por abrasão (Figura 10).

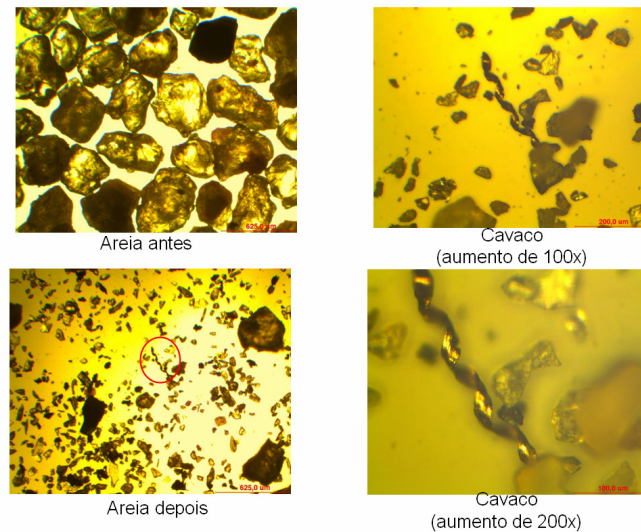


Figura 10. a) Grãos de areia antes dos ensaios, imagem obtida com 32X de aumento;b) Grãos de areia após os ensaios, evidência de cavaco arrancado dos corpos de prova em imagem obtida com 32X de aumento; (c), (d) Evidências de um cavaco, imagens obtidas a 100X, 200X.

4 DISCUSSÃO

Para os dados de perda mássica contra a distância de deslizamento, não houve uma relação linear entre os resultados pois, ao se dobrar o tempo de ensaio não houve o dobro da perda de massa. Isto pode estar relacionado com a área real de contato de cada ensaio, já que a carga é constante, as velocidades médias de deslizamento foram controladas para que fossem o mais próxima possível uma da outra. Para o ensaio de 30 minutos realizado no CP02, obteve-se a maior perda mássica, o que deve estar relacionado ao fato da dureza da superfície externa ser menor do que a do substrato da FPS.

Nas medidas de rugosidade fica evidenciada uma tendência dos valores de rugosidade convergirem para uma faixa de valores, a superfície externa (CP02) parte de uma rugosidade maior, que tendeu a diminuir, enquanto o inverso ocorreu para o CP01.

Os gráficos de potência consumida e temperatura mostraram-se coerentes se analisarmos a tendência da temperatura acompanhar o comportamento da potência, no entanto, por terem tempos de resposta diferentes, a temperatura demora um pouco mais a refletir as variações de potência. Entretanto, existe uma variação cíclica da potência consumida em todos os gráficos (em média 5 W) no decorrer dos ensaios, tendência que se associou às flutuações em torno de uma medida nominal e à resolução do instrumento de medida.

As imagens de Microscopia Óptica evidenciaram diferenças nas texturas das superfícies, confirmando os resultados de medidas de rugosidade. No entanto, para que se possa ter um estudo de integridade superficial, faz-se necessária a adoção de parâmetros híbridos de rugosidade, já que o parâmetro Ra fornece apenas uma média aritmética das alturas e profundidades de picos e vales.

Fica claro nas Microscopias dos grãos de areia que há uma redução do tamanho médio de grão de abrasivo em relação ao inicial. As imagens deixam claro também a existência do mecanismo de desgaste abrasivo, pois revelou-se um “cavaco” característico do micro-corte ou micro-usinagem que, em concordância

com a literatura, caracterizam esse tipo de desgaste abrasivo, resultante do deslizamento de partículas duras (quartzo – SiO₂) sobre o material mais macio (aço).

5. CONCLUSÃO

1. A bancada construída para ensaios acelerados em laboratório de desgaste abrasivo de ferramentas de penetração de solo mostrou-se eficiente, funcional e ágil na avaliação pretendida;
2. A diferença de durezas entre a superfície externa e a interna de FPS proporcionou perdas mássicas diferentes, evidenciando a influência direta da dureza do material no desgaste abrasivo e a não linearidade entre o desgaste e a distância de deslizamento, contrariando o estabelecido pela Equação de Archard;
3. Constatou-se uma tendência dos valores de rugosidade Ra convergirem para um valor aproximado, seja na superfície externa ou interna, o que demanda ensaios adicionais;
4. A medida de potência elétrica consumida pelo motor comparada à resposta da temperatura mostrou-se coerente;
5. As imagens de Microscopia Óptica de cavacos gerados evidenciaram com nitidez o Mecanismo de desgaste abrasivo por micro-corte nas FPS.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao PPGEM – UFRN e à CAPES pela concessão de bolsas que possibilitaram esta pesquisa; aos alunos de graduação em Engenharia de Materiais, Clarissa Mendonça e Diogo Mendonça; aos alunos de graduação em Engenharia Mecânica, Alessandro Natalini e Felipe; à Oficina Mecânica; ao técnico mecânico Paulino, e aos demais integrantes do Grupo de Estudos de Tribologia que, direta e indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 UYGUR, I. Microstructure and wear properties of AISI 1038 H steel weldments. *Industrial Lubrication and Tribology*, v.58, n. 6, p.303-311, 2006.
- 2 ASM, *ASM HANDBOOK: Friction, lubrication, and Wear Technology*. ASM International, v. 18, p. 338, 1992.
- 3 HUTCHINGS, I. M. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. – (Metallurgy & Materials Science Series), v. 1, 273p, 1992.