

**EFEITO DO TEMPO DE ENSAIO E DA CONCENTRAÇÃO
DE LAMA ABRASIVA SOB O COMPORTAMENTO AO
DESGASTE MICROABRASIVO DE UMA LIGA DE AÇO
CONTENDO ALUMINETOS DE FERRO**

COZZA, Ronaldo Câmara; Doutor ^{1,2,3}

DE PAULA, Angel Felipe Magnossão; Estudante de Engenharia Mecânica ²

WILCKEN, Jorge Thiago de Sousa Lima; Estudante de Engenharia Mecânica ²

SCHÖN, Cláudio Geraldo; Livre-Docente ³

¹ CEETEPS – Centro Estadual de Educação Tecnológica “Paula Souza”

Faculdade de Tecnologia de Mauá – FATEC-Mauá

Departamento de Fabricação Mecânica

Av. Antônia Rosa Fioravante, 804 – 09390-120, Mauá, SP.

ronaldo.cozza@fatec.sp.gov.br

² Centro Universitário da FEI – Fundação Educacional Inaciana

“Padre Sabóia de Medeiros”

Departamento de Engenharia Mecânica

Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972 – 09850-901

São Bernardo do Campo, SP.

angel.magnossao@gmail.com (A.F.M. de Paula)

jt.wilcken@uol.com.br (J.T.S.L. Wilcken)

³ USP – Universidade de São Paulo

Escola Politécnica

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Av. Prof. Mello Moraes, 2463 – 05508-030, São Paulo, SP.

claudio.schon@poli.usp.br

RESUMO

O propósito deste trabalho é pesquisar a influência do tempo de ensaio (t) e da concentração de lama abrasiva (C) sob o comportamento ao desgaste microabrasivo de uma liga de aço contendo aluminetos de ferro. Ensaios “ball-cratering” foram conduzidos sob a liga fabricada Fe-30Al-6Cr (at.%), junto a uma esfera de aço AISI 52100 e lamas abrasivas preparadas com óxido de alumínio (Al_2O_3) + água. Diferentes condições de ensaio foram estabelecidas e os resultados mostraram que o tempo de ensaio e a concentração da lama abrasiva influenciaram as atuações dos modos de desgaste microabrasivo e o volume de desgaste (V), sendo V proporcional à t e C ($V \propto (t,C)$).

PALAVRAS-CHAVE: Desgaste Microabrasivo. Intermetálicos. Aluminetos de ferro.

ABSTRACT

The purpose of this work is to research the influence of the test time (t) and abrasive slurry concentration (C) on the micro-abrasive wear behaviour of an iron aluminide alloy. Ball-cratering wear tests were conducted with an Fe-30Al-6Cr (at.%) alloy, AISI 52100 bearing steel sphere and abrasive slurries prepared with Al_2O_3 + water. Different test conditions were established and the results showed that the test time and abrasive slurry concentration presented influence on the micro-abrasive wear modes actions and wear volume, being V proportional to t and C ($V \propto (t,C)$).

KEY-WORDS: *Micro-abrasive wear. Intermetallics. Iron aluminides.*

INTRODUÇÃO

1 ALUMINETOS

Nas últimas décadas, aluminetos de níquel, ferro, titânio, nióbio e cobalto vêm sendo minuciosamente estudados, devido, principalmente, à possibilidade de adoção como materiais estruturais sujeitos a elevadas temperaturas (DEEVI E SIKKA, 1996).

Tais aluminetos apresentam uma alta concentração de alumínio (DEEVI E SIKKA, 1996), capaz de formar uma contínua e aderente camada de alumina (Al_2O_3) sobre uma superfície exposta ao ar ou a atmosferas contendo oxigênio. Além da vantagem desta camada de alumina proteger o material contra grandes temperaturas de oxidação e corrosão (DEEVI E SIKKA, 1996; MORRIS, 1998; SCHENEIBEL, GEORGE E ANDERSON, 1997), devido a apresentar maior estabilidade termodinâmica que o óxido de cromo (Cr_2O_3), os aluminetos possuem menores densidades, elevados pontos de fusão e exibem consideráveis propriedades mecânicas sob temperaturas excessivas em razão da sua estrutura cristalina (MORRIS, 1998; DOBEŠ E MILIČKA, 2010; STEIN, SCHNEIDER E FROMMEYER, 2003).

Em particular, as propriedades mecânicas de aços contendo aluminetos de ferro podem ser trabalhadas pela variação da porcentagem de alumínio, tipo de tratamento térmico e tamanho de grão fazendo com que, em função destes parâmetros, determinados materiais sejam direcionados para aplicações mecânicas-metalúrgicas específicas (BYSTRZYCKI *et al.*, 2010; MORRIS E MORRIS-MUÑOZ, 1999).

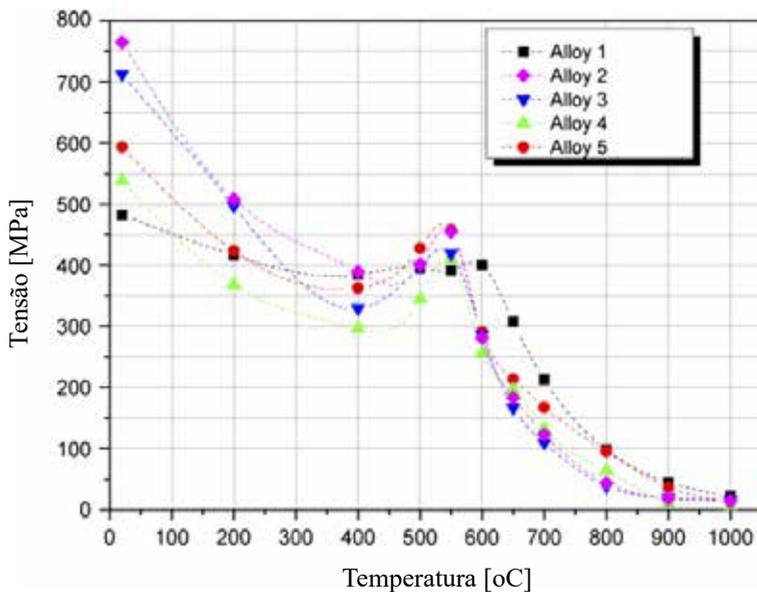
Em aços-carbono, com o aumento da temperatura, observa-se a diminuição da tensão limite de escoamento (σ_{LE}), tensão limite de resistência (σ_{LR}) e da tensão de ruptura (σ_R), com a manutenção do valor do módulo de elasticidade longitudinal (E). A inserção de aluminetos de ferro (Fe_3Al) pode fazer com que, atingindo-se um limite de, aproximadamente, 500°C , as grandezas σ_{LE} , σ_{LR} e σ_R permaneçam constantes ou aumentem (HANUS *et al.*, 2010; KREIN *et al.*, 2007; RISANTI E SAUTHOFF, 2011; WU *et al.*, 2007). A Figura 1 (KREIN *et al.*, 2007) exemplifica tais comportamentos.

Além dos comportamentos diferenciados, a inclusão de Fe_3Al diminui a densidade do aço a um valor de 6 kg/dm^3 , frente a $7,8 \text{ kg/dm}^3$

observado em aços-carbono convencionais. Esta redução equivale a, aproximadamente, 20%.

O objetivo dos resultados apresentados na Figura 1 foi discutir o comportamento de diferentes materiais contendo aluminetos de ferro sob variação de temperatura.

Figura 1 – Comportamento, em função da temperatura, de ligas contendo aluminetos de ferro atura

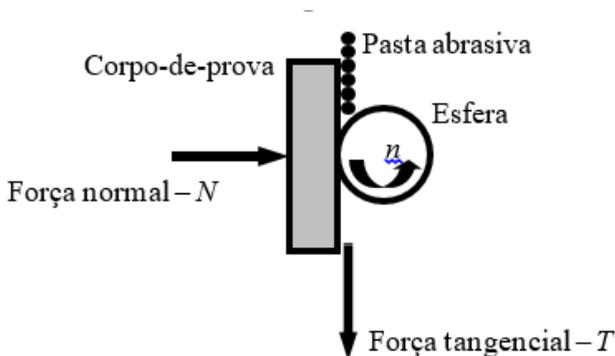


Fonte: Krein *et al.*(2007).

1.1 ENSAIO DE DESGASTE MICROABRASIVO POR ESFERA ROTATIVA

A Figura 2, de acordo com Cozza (2011), ilustra, de forma esquemática, o princípio do “ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa”, chamado de “*ball-cratering abrasion test*” ou “*micro-scale abrasive wear test*” (ADACHI E HUTCHINGS, 2003), na Língua Inglesa.

Figura 2 – Representação esquemática do princípio do ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa



Fonte: Cozza (2011).

Ao lado da esfera de ensaio, que se encontra somente sob movimento de rotação (n), está o corpo-de-prova. Durante os ensaios, é inserida uma pasta abrasiva, geralmente composta por algum pó abrasivo (por exemplo, carbeto de silício – SiC) e água destilada. A aplicação da força normal (N) sobre o corpo-de-prova, o contato e o movimento relativo entre os componentes do sistema tribológico gera uma força tangencial (força de atrito) – T e uma calota esférica no corpo-de-prova, usualmente denominada de “cratera de desgaste” (“*wear crater*”, em Inglês).

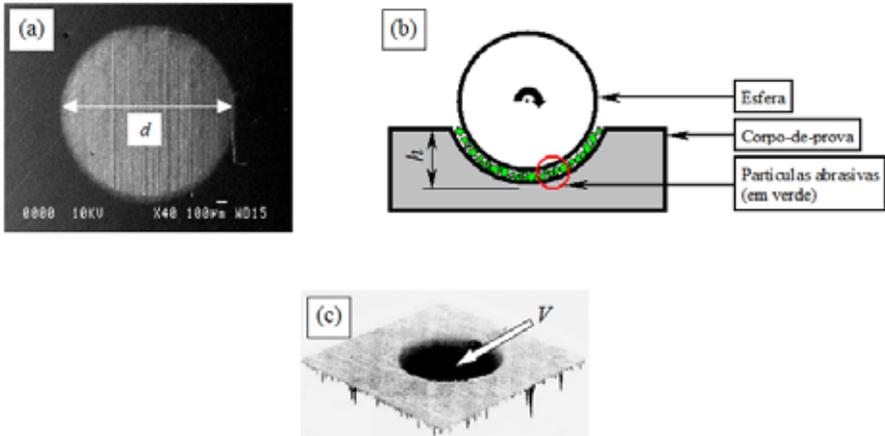
Não havendo a formação de “*ridging*” (ALLSOPP, TREZONA E HUTCHINGS, 1998), que será explicado posteriormente, durante os ensaios, o corpo-de-prova não entra em contato com a esfera; entre estes dois elementos, estão as partículas abrasivas.

Em um ensaio de desgaste microabrasivo por esfera rotativa é possível definir a *i*) força normal, *ii*) distância de deslizamento (S) (entre a esfera e o corpo-de-prova, *iii*) diâmetro da esfera de ensaio, *iv*) rotação da esfera de ensaio, *v*) concentração da pasta abrasiva (C), *vi*) viscosidade do fluido da pasta abrasiva, *vii*) características (dureza – H , forma – F e tamanho – D_p) das partículas abrasivas e a *viii*) vazão do composto abrasivo (introduzido entre o corpo-de-prova e a esfera de ensaio), além dos próprios materiais

do corpo-de-prova e da esfera de ensaio.

Em uma cratera de desgaste, são analisadas três grandezas geométricas: diâmetro (d), profundidade (h) e volume (de material removido) (V). A Figura 3 apresenta essas grandezas.

Figura 3 – Imagens de crateras de desgaste



Fonte: (a) diâmetro – d (KELLY E HUTCHINGS, 2001), (b) profundidade – h (ilustração esquemática) e (c) volume – V (Cortesia dos Professores Washington Martins da Silva Júnior e José Daniel Biasoli de Mello – Universidade Federal de Uberlândia – UFU).

Em função de “ d ”, a profundidade e o volume da cratera de desgaste podem ser calculados pelas Equações 1 e 2 (RUTHERFORD E HUTCHINGS, 1997), respectivamente.

$$h \cong \frac{d^2}{8R} \quad \text{para } d \ll R \quad (1)$$

$$V \cong \frac{\pi d^4}{64R} \quad \text{para } d \ll R \quad (2)$$

Sendo R , o raio da esfera de ensaio.

1.2 MODOS DE DESGASTE MICROABRASIVO

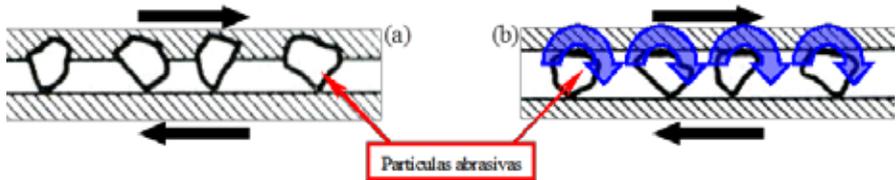
Propriedades como dureza, tamanho de grão, tenacidade e porosidade do material do corpo-de-prova influenciam diretamente nos resultados de ensaios “*ball-cratering*” (DOGAN E HAWK, 2001). Contudo, vale a ressalva que a resistência ao desgaste microabrasivo não é uma propriedade do material, pois depende dos parâmetros do ensaio (como força normal, rotação da esfera, distância de deslizamento, concentração e vazão da pasta abrasiva).

É sabido, também, que o coeficiente de atrito, a taxa e o coeficiente de desgaste não são propriedades do material, e sim uma resposta do tribo-sistema (materiais envolvidos e condições a que estão submetidos). Portanto, dependem, também, da força normal e/ou tangencial, do tempo de ensaio e da concentração da pasta abrasiva.

Por sua vez, os materiais envolvidos e os parâmetros de ensaio determinam o tipo de movimentação das partículas abrasivas sobre a superfície do corpo-de-prova, classificando o desgaste microabrasivo em três categorias (COZZA, 2006; COZZA, 2011):

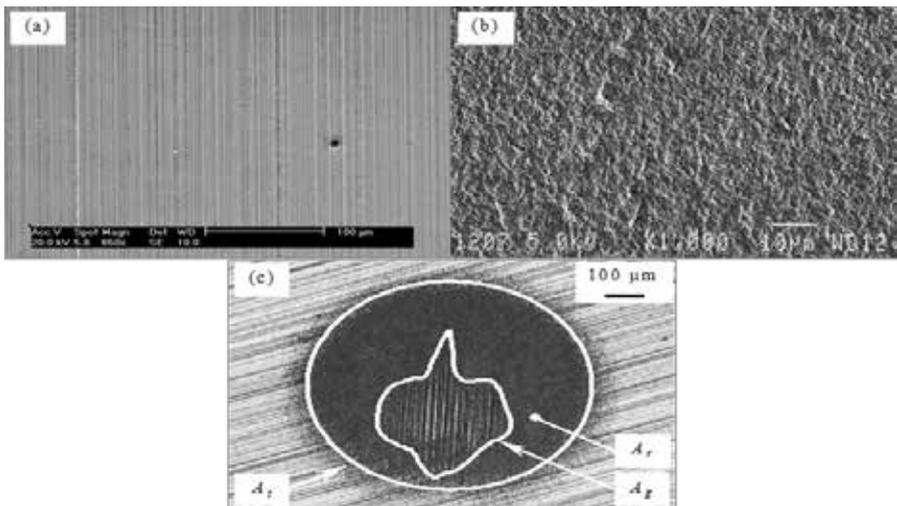
- a) ***Desgaste Microabrasivo por Riscamento.*** As partículas abrasivas encontram-se incrustadas na esfera, promovendo o riscamento da superfície da calota. Ocorre, geralmente, sob elevadas forças normais e baixas concentrações de pasta abrasiva (Figuras 4a e 5a);
- b) ***Desgaste Microabrasivo por Rolamento.*** As partículas abrasivas encontram-se soltas e rolam entre a esfera e a superfície em desgaste, gerando impressões aleatórias na calota formada. Ocorre, geralmente, sob baixas forças normais e elevadas concentrações de pasta abrasiva (Figuras 4b e 5b);
- c) ***Desgaste Microabrasivo Misto.*** Este modo de desgaste microabrasivo apresenta tanto características do modo “riscamento” quanto do modo “rolamento”. Observa-se a ocorrência de desgaste microabrasivo por riscamento no centro da cratera de desgaste e desgaste microabrasivo por rolamento nas bordas da cratera (Figura 5c).

Figura 4 – Possíveis movimentações das partículas abrasivas, gerando desgaste microabrasivo por (a) riscamento e (b) rolamento



Fonte: Hutchings (1992).

Figura 5 – Micrografia de crateras de desgaste que sofreram desgaste microabrasivo



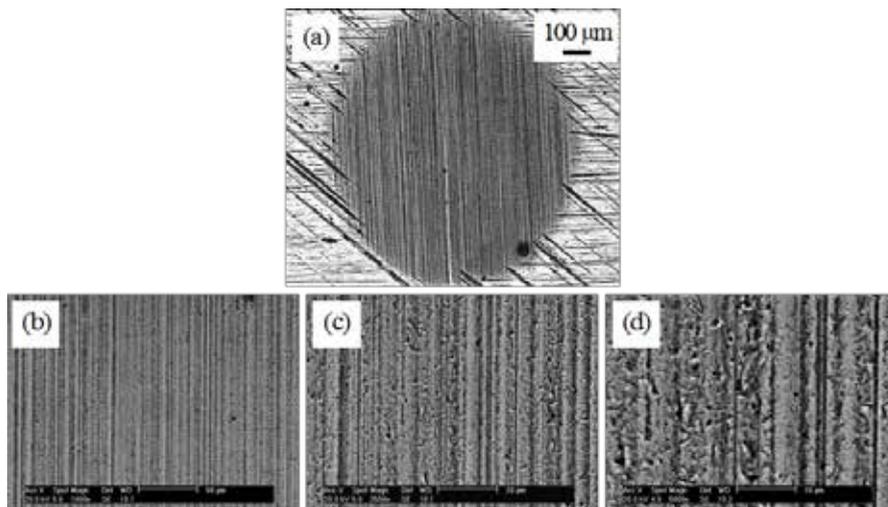
Fonte: (a) riscamento (COZZA, TANAKA E SOUZA, 2009), (b) rolamento (TREZONA, ALLSOPP E HUTCHINGS, 1999) e (c) misto (COZZA *et al.*, 2007). Em (c), A_t é a área total da cratera de desgaste, A_g é a área de atuação de desgaste microabrasivo por riscamento e A_r a área de atuação de desgaste microabrasivo por rolamento.

Além dos modos “riscamento”, “rolamento” e “misto”, foi identificado e classificado por Cozza, Tanaka e Souza (2009; 2011) outro modo de desgaste microabrasivo, denominado de “*micro-rolling abrasion*” (micro-rolamento), em que, numa escala macroscópica,

observa-se apenas desgaste por riscamento (Figura 6a (COZZA, 2011; COZZA, TANAKA E SOUZA, 2009; COZZA, TANAKA E SOUZA, 2011)) mas, ao utilizar Microscopia Eletrônica de Varredura, nota-se que há desgaste por rolamento juntamente com o desgaste por riscamento (Figura 6b-d (COZZA, 2011; COZZA, TANAKA E SOUZA, 2009; COZZA, TANAKA E SOUZA, 2011)).

Isso se dá pelo fato das maiores partículas abrasivas estarem sujeitas a uma força normal maior e possuindo apenas movimento de translação, enquanto as partículas menores, sujeitas a uma força normal menor, ficam livres para rolar (gerando desgaste por rolamento, pois possuem movimentos de translação e rotação) (COZZA, 2011; COZZA, 2014).

Figura 6 – Cratera de desgaste analisada sob diferentes ampliações



Fonte: (a) Imagem obtida por Microscopia Óptica e (b)-(d) imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (COZZA, 2011; COZZA, TANAKA E SOUZA, 2009; COZZA, TANAKA E SOUZA, 2011).

1.3 FENÔMENOS DE POSSÍVEL OCORRÊNCIA NAS CRATERAS DE DESGASTE

Transição entre os modos de desgaste microabrasivo.

À medida que o tempo de ensaio – t (ou, a distância de deslizamento – S) aumenta, pode-se notar a predominância de desgaste microabrasivo por rolamento, devido ao conseqüente aumento da área da calota.

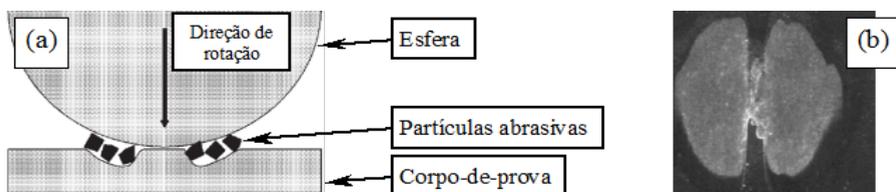
Isso se dá por conta da pressão no início do ensaio ser maior, ocasionando maior dificuldade de rolamento das partículas abrasivas. Entretanto, com o decorrer do ensaio, a pressão diminui, possibilitando o rolamento das mesmas, gerando uma cratera com características de desgaste microabrasivo por rolamento (COZZA, 2014).

“Ridging”.

Dependendo das condições de ensaio e dos materiais envolvidos, a partir de certo ponto, pode haver a diminuição de V com o aumento de N , devido a ocorrência de “ridging”.

Em termos práticos, “ridging” (Figura 7), (ALLSOPP, TREZONA E HUTCHINGS, 1998; GEE *et al.*, 2003)), é o contato direto entre a esfera e o corpo-de-prova, que acontece quando a “camada” de partículas abrasivas deixa de atuar. Geralmente, “ridging” ocorre na região central da cratera de desgaste, em consequência da elevada “pressão de contato”, o que dificulta, ou veta, por completo, a penetração de partículas abrasivas.

Figura 7 – Princípio do fenômeno “ridging”

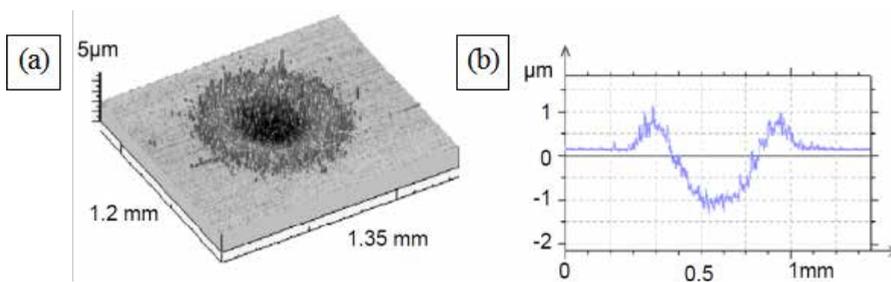


Fonte: (a) Allsopp, Trezona e Hutchings (1998) e
(b) “ridges” formado na cratera de desgaste (Gee *et al.*, 2003).

“Pile-up”.

Este fenômeno é caracterizado e pode ser definido pela elevação de material acima da superfície do corpo-de-prova, como mostra a Figura 8 (SCHIFFMANN, BETHKE E KRISTEN, 2005). A Figura 8a é uma imagem, obtida por interferometria a laser, de uma cratera de desgaste e, a Figura 8b, seu perfil, em que é observado material sobressalente à superfície (“pile-up”).

Figura 8 – (a) Cratera de desgaste com ocorrência de “pile-up” e (b) perfil da cratera de desgaste (a)

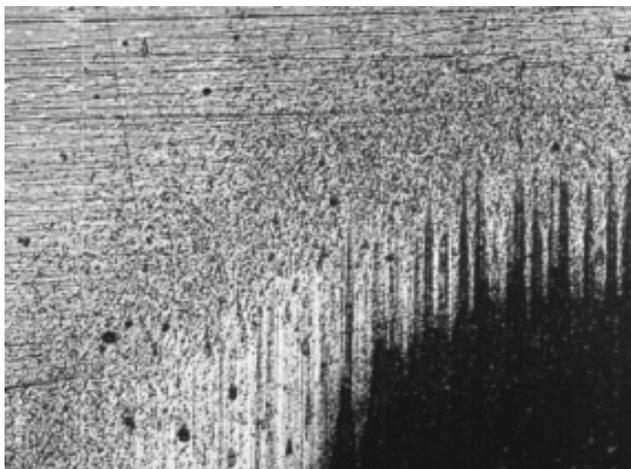


Fonte: Schiffmann, Bethke e Kristen (2005).

“Scuffing”.

Diferente do conceito estabelecido para definir o “desgaste adesivo” ocasionado pela falha de lubrificação “elasto-hidrodinâmica” entre dois elementos em movimento relativo, “scuffing”, em desgaste microabrasivo por esfera rotativa, são riscos que ocorrem na borda da cratera de desgaste, na direção de deslizamento da esfera de ensaio. A Figura 9 mostra a borda de uma cratera de desgaste, gerada em aço-ferramenta revestida com nitreto de titânio (GEE *et al.*, 2003), em que é relatada a ocorrência deste fenômeno.

Figura 9 – Ocorrência de “scuffing”



Fonte: Gee *et al* (2003).

O “*scuffing*” é um fenômeno ainda não completamente compreendido pela comunidade científica. Entretanto, Trezona e Hutchings (1999) deixam implícito que, provavelmente, o mesmo ocorra, somente, quando a dureza do corpo-de-prova for menor que a dureza da esfera.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

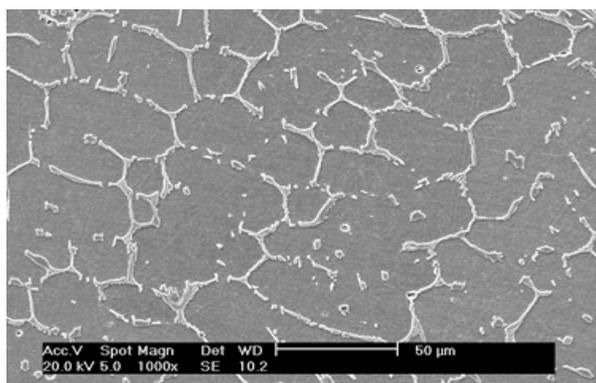
Corpo-de-prova.

Foram preparadas ligas de Fe-30Al-6Cr (at.%) em um forno de indução sem proteção atmosférica, compostas por materiais recicláveis: sucata de aço inoxidável ferrítico AISI 444 como fonte de ferro, cromo, molibdênio e latas de alumínio, como fonte de alumínio; aço SAE 1020 foi inserido para balancear os teores de carbono e ferro das ligas (BORGES, 2010).

Para a análise de sua microestrutura, a superfície da amostra foi lixada obedecendo a seguinte sequência de lixas: grão 220, 320, 400, 600 e 1000. Em seguida, a superfície foi polida com pastas diamantadas de diferentes granulometrias, na sequência de 6, 3 e 1 μm . A última etapa foi o ataque químico com Vilela (95% álcool etílico, 5% HCl e 1 g de ácido pícrico) (BORGES, 2010).

A Figura 10 apresenta a microestrutura e a composição química do corpo-de-prova (aço contendo aluminetos de ferro) utilizado (BORGES, 2010).

Figura 10 – Microestrutura e composição química do corpo-de-prova utilizado



Elemento químico	% (em peso)
Al	14,14
Cr	4,95
Mo	0,75
C	0,66
Fe	78,57

Fonte: Borges (2010).

Esferas.

Foram utilizadas esferas de aço AISI 52100 (temperado e revenido), de diâmetro $D = 25,4 \text{ mm}$ (1").

Lamas abrasivas.

As lamas abrasivas utilizadas foram compostas por óxido de alumínio – Al_2O_3 (Figura 11), com tamanho médio de partícula de μm , e água.

Figura 11 – Material abrasivo (Al_2O_3) utilizado nas preparações das lamas abrasivas



2.2 PARÂMETROS DE ENSAIO

A Tabela 1 exibe as condições de ensaio estabelecidas para os experimentos.

Tabela 1 – Condições de ensaio definidas para os experimentos

Condição de ensaio \Rightarrow	1	2	3
Força normal – N [N]	0,4	0,4	0,4
Distância de deslizamento – S [m]	5,6	11,2	22,4
Concentração da lama abrasiva – C_1 (em volume)	5% Al_2O_3 + 95% H_2O	5% Al_2O_3 + 95% H_2O	5% Al_2O_3 + 95% H_2O
Concentração da lama abrasiva – C_2 (em volume)	50% Al_2O_3 + 50% H_2O	50% Al_2O_3 + 50% H_2O	50% Al_2O_3 + 50% H_2O
Rotação (esfera) – n [rpm]	70	70	70
Velocidade tangencial (esfera) – v [m/s]	0,09	0,09	0,09
Tempo de ensaio – t [min]	1	2	4

A força normal atuante foi de $N = 0,4$ N, enquanto que os valores da rotação e do diâmetro da esfera de ensaio ficaram definidos em $n = 70$ rpm e $D = 25,4$ mm, respectivamente, resultando em $v = 0,09$ m/s. Concentrações de lamas abrasivas de $C_1 = 5\% \text{ Al}_2\text{O}_3 + 75\% \text{ H}_2\text{O}$ e $C_2 = 50\% \text{ Al}_2\text{O}_3 + 50\% \text{ H}_2\text{O}$ (em volume) foram adotadas.

Fixaram-se três tempos de ensaio, $t_1 = 60$ s (1 min), $t_2 = 120$ s (2 min) e $t_3 = 240$ s (4 min), cujas distâncias de deslizamento correspondentes são, respectivamente, $S_1 = 5,6$ m, $S_2 = 11,2$ m e $S_3 = 22,4$ m.

Os ensaios foram realizados sem paradas intermediárias e, com auxílio de um conta-gotas, a lama abrasiva foi inserida a cada $t = 10$ s entre a esfera de ensaio e o corpo-de-prova.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ANÁLISE DAS AÇÕES DOS MODOS DE DESGASTE MICROABRASIVO

A Figura 12 mostra imagens de crateras de desgaste geradas nos ensaios.

Figura 12 – Exemplos de crateras de desgaste obtidas nos ensaios. Ocorrência de desgaste microabrasivo por (a) riscamento e (b) rolamento





Para a concentração de lama abrasiva “ $C_1 = 5\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 95\% \text{H}_2\text{O}$ ” todas as crateras de desgaste apresentaram o modo de desgaste microabrasivo “riscamento”, independente do tempo de ensaio e distância de deslizamento, enquanto que para a concentração de lama abrasiva “ $C_2 = 50\% \text{Al}_2\text{O}_3 + 50\% \text{H}_2\text{O}$ ” todas as crateras de desgaste apresentaram o modo de desgaste microabrasivo “rolamento”, também independentemente do tempo de ensaio e distância de deslizamento.

Tais resultados estão em concordância qualitativa com a literatura, principalmente com os trabalhos de Adachi e Hutchings (2003; 2005) e Trezona *et al.* (1999) que, além de uma análise envolvendo força normal e concentração de lama abrasiva, vinculam as ações dos modos de desgaste microabrasivo com o tamanho médio das partículas abrasivas, formato das partículas abrasivas e propriedades dos materiais envolvidos (H – dureza, E – Módulo de Elasticidade Longitudinal e ν – Coeficiente de Poisson).

Analisando o sistema tribológico “*corpo-de-prova – partículas abrasivas – esfera*”, observa-se que, pela Equação 3 (Cozza, 2014), a pressão (P) agindo sobre o sistema diminui com o aumento do tempo de ensaio (ou, distância de deslizamento), devido ao consequente aumento de A_t (área total da cratera de desgaste) e manutenção da força normal (N).

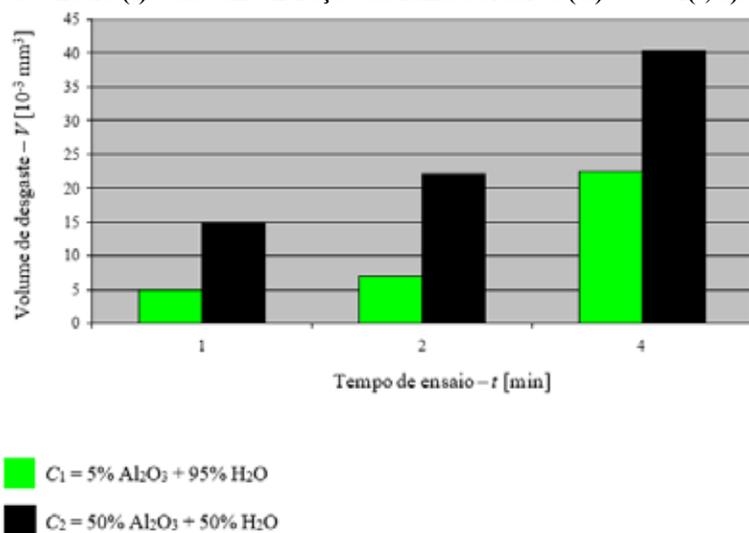
$$P = \frac{N}{A_t} \quad (3)$$

A predominância dos modos de desgaste microabrasivo “riscamento” ou “rolamento” foi dependente das condições de ensaio e esta transição pode ser explicada pelo fato de que, com o aumento da concentração da lama abrasiva, a força normal agindo sobre cada partícula abrasiva diminui, fazendo com que, no decorrer dos ensaios, elas adquiram maior possibilidade de rolar, como pesquisado por Cozza (2013; 2015).

3.2 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO VOLUME DE DESGASTE

Os gráficos de $V = f(t, C)$ apresentados na Figura 13 mostram que o volume de desgaste (V) foi proporcional ao tempo de ensaio (t) e à concentração da lama abrasiva (C), concordando, qualitativamente, com a literatura (COZZA, 2013; MERGLER E HUIS IN ‘T VELD, 2003; TREZONA, ALLSOPP E HUTCHINGS, 1999).

Figura 13 – Comportamento do volume de desgaste (V) em função do tempo de ensaio (t) e da concentração de lama abrasiva (C) – $V = f(t, C)$.



Observa-se que, ao manter a concentração da lama abrasiva (C) constante, o volume de desgaste (V) acompanhou o aumento do tempo de ensaio (t) (ou, a distância de deslizamento – S).

De fato, o aumento do volume de desgaste com a distância de deslizamento seguiu a Lei de Archard (Equação 4), que mostra que V é proporcional a S . Além disso, o aumento de V com a concentração da lama abrasiva foi relatado, entre outros pesquisadores, por Mergler e Huis in 't Veld (2003) e Trezona *et al.* (1999).

$$V = k.S.N \quad (4)$$

Sendo k o coeficiente de desgaste.

Embora o aumento da concentração da lama abrasiva favoreça a atuação de desgaste microabrasivo por rolamento que, a princípio e, relativamente, é mais brando que o modo riscamento, há uma quantidade maior de partículas abrasivas entre a esfera e o corpo-de-prova participando do processo de desgaste, aumentando, conseqüentemente, a quantidade de material removido da calota em formação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Três pontos podem ser destacados neste trabalho:

- i) Com o aumento do tempo de ensaio (t) e da concentração da pasta abrasiva (C) foi reportado um aumento do volume de desgaste (V);
- ii) O aumento do volume de desgaste (V) com a distância de deslizamento (S) seguiu a equação de Archard, que mostra que o volume de desgaste é linearmente proporcional à distância de deslizamento (ou, tempo de ensaio – t);
- iii) Com relação ao aumento do volume de desgaste com a concentração da lama abrasiva, a explicação baseia-se no fato de que, com a elevação C há uma quantidade maior de partículas abrasivas agindo sobre a calota em formação.

REFERÊNCIAS

ADACHI, K.; HUTCHINGS, I.M.. *Wear-mode mapping for the micro-scale abrasion test*. Wear, vol. 255, p. 23-29, 2003.

ADACHI, K.; HUTCHINGS, I.M.. *Sensitivity of wear rates in the micro-scale abrasion test to test conditions and material hardness*. Wear, vol. 258, p. 318-321, 2005.

ALLSOPP, D.N.; TREZONA, R.I.; HUTCHINGS, I.M.. *The effects of ball surface condition in the micro-scale abrasive wear test*. Tribology Letters, vol. 5, p. 259-264, 1998.

BORGES, D.F.L.. *Processamento e caracterização de aluminetos de ferro obtidos a partir de matéria-prima reciclada*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil, 2010, 80 p.. Disponível on-line: <http://www.teses.usp.br/>.

BYSTRZYCKI, J.; FRACZKIEWICZ, A.; ŁYSZKOWSKI, R.; MONDON, M.; PAKIELA, Z.. *Microstructure and tensile behavior of Fe-16Al-based alloy after severe plastic deformation*. Intermetallics, vol. 18, p. 1338-1343, 2010.

COZZA, R.C.. *Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste micro-abrasivo*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, Brasil, 2006, 217 p.. Disponível on-line: <http://www.teses.usp.br/>.

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, 327 p.. Disponível on-line: <http://www.teses.usp.br/>.

COZZA, R.C.. *Effect of pressure on abrasive wear mode transitions in micro-abrasive wear tests of WC-Co P20*. Tribology International, vol. 57, p. 266-271, 2013.

COZZA, R.C.. *Third abrasive wear mode: is it possible?* Journal of Materials Research and Technology, vol. 3 (2), p. 191-193, 2014.

COZZA, R.C.. *Effect of sliding distance on abrasive wear modes transition.* Journal of Materials Research and Technology, 2015. *Accepted for publication.* DOI information: 10.1016/j.jmrt.2014.10.007.

COZZA, R.C.; DE MELLO, J.D.B.; TANAKA, D.K.; SOUZA, R.M.. *Relationship between test severity and wear mode transition in micro-abrasive wear tests.* Wear, vol. 263, p. 111-116, 2007.

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, vol. 267, p. 61-70, 2009.

COZZA, R.C.; TANAKA, D.K.; SOUZA, R.M.. *Friction coefficient and wear mode transition in micro-scale abrasion tests.* Tribology International, vol. 44, 1878-1889, 2011.

DEEVI, S.C.; SIKKA, V.K.. *Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing, and applications.* Intermetallics, vol. 4, p. 357-375, 1996.

DOBEŠ, F.; MILIČKA, K.. *Estimation of ductility of Fe-Al alloys by means of small punch test.* Intermetallics, vol. 18, p. 1357-1359, 2010.

DOGAN, C.P.; HAWK, J.A.. *Microstructure and abrasive wear in silicon nitride ceramics.* Wear, vol. 250, p. 256-263, 2001.

GEE, M.G.; GANT, A.J.; HUTCHINGS, I.M.; BETHKE, R.; SCHIFFMAN, K.; VAN ACKER, K.; POULAT, S.; GACHON, Y.; VON STEBUT, J.. *Progress towards standardisation of ball cratering.* Wear, vol. 255, p. 1-13, 2003.

HANUS, P.; BARTSCH, E.; PALM, M.; KREIN, R.; BAUER-PARTENHEIMER, K.; JANSCHKEK, P. *Mechanical properties of a forged Fe-25Al-2Ta steam turbine blade*. Intermetallics, vol. 18, p. 1379-1384, 2010.

HUTCHINGS, I.M.. *Tribology – Friction and Wear of Engineering Materials*. 7th Edition, Edward Arnold, a division of Hodder Headline PLC, London, UK, 1992.

KELLY, D.A.; HUTCHINGS, I.M.. *A new method for measurement of particle abrasivity*. *Wear*, vol. 250, p. 76-80, 2001.

KREIN, R.; SCHNEIDER, A.; SAUTHOFF, G.; FROMMEYER, G.. *Microstructure and mechanical properties of Fe₃Al-based alloys with strengthening boride precipitates*. Intermetallics, vol. 15, p. 1172-1182, 2007.

MERGLER, Y.J.; HUIS IN 'T VELD, A.J.. *Micro-abrasive wear of semi-crystalline polymers*. Tribology and Interface Engineering Series 41, p. 165-173, 2003. Tribological Research and Design for Engineering Systems – Proceedings of the 29th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Bodington Hall, University of Leeds, UK.

MORRIS, D.G.. *Possibilities for high-temperature strengthening in iron aluminides*. Intermetallics, vol. 6, p. 753-758, 1998.

MORRIS, D.G.; MORRIS-MUÑOZ, M.A.. *The influence of microstructure on the ductility of iron aluminides*. Intermetallics, vol. 7, p. 1121-1129, 1999.

RISANTI, D.D.; SAUTHOFF, G.. *Microstructures and mechanical properties of Fe-Al-Ta alloys with strengthening Laves phase*. Intermetallics, vol. 19, p. 1727-1736, 2011.

RUTHERFORD, K.L.; HUTCHINGS, I.M.. *Theory and application of a micro-scale abrasive wear test*. Journal of Testing and Evaluation – JTEVA, vol. 25 (2), p. 250-260, 1997.

SCHIFFMANN, K.I.; BETHKE, R.; KRISTEN, N.. *Analysis of perforating and non-perforating micro-scale abrasion tests on coated substrates*. Surface and Coatings Technology, vol. 200, p. 2348-2357, 2005.

SCHNEIBEL, J.H.; GEORGE, E.P.; ANDERSON, I.M.. *Tensile ductility, slow crack growth, and fracture mode of ternary B2 iron aluminides at room temperature*. Intermetallics, vol. 5, p. 185-193, 1997.

STEIN, F.; SCHNEIDER, A.; FROMMEYER, G.. *Flow stress anomaly and order-disorder transitions in Fe₃Al-based Fe-Al-Ti-X alloys with X = V, Cr, Nb, or Mo*. Intermetallics, vol. 11, p. 71-82, 2003.

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, vol. 225-229, p. 205-214, 1999.

TREZONA, R.I.; HUTCHINGS, I.M.. *Three-body abrasive wear testing of soft materials*. Wear, vol. 233-235, p. 209-221, 1999.

WU, D.; BAKER, I.; MUNROE, P.R.; GEORGE, E.P.. *The yield strength anomaly of single-slip-oriented Fe-Al single crystals*. Intermetallics, vol. 15, p. 103-107, 2007.