

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE TRÊS REVESTIMENTOS FORMADOS POR LIGAS METÁLICAS CONSTITUÍDAS PELO SISTEMA Fe-Cr-C POR MEIO DE ENSAIO DE ABRASÃO EM RODA DE BORRACHA

Ronan Jackson Silva, engronan@yahoo.com.br¹

Leonardo Neves, leonardoneves@deii.cefetmg.br¹

Maria Celeste Monteiro de Souza Costa, mcelestemsc@deii.cefetmg.br¹

Ernane Rodrigues da Silva, ernanerodrigues@gmail.com¹

¹Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Avenida Amazonas, 5253, Nova Suiça, Belo Horizonte – MG – Cep: 30480-000.

Resumo: O fenômeno de desgaste é um dos principais fatores que influenciam o aumento de custo dentro das indústrias de beneficiamento mineral. A resistência ao desgaste abrasivo é uma característica requerida para aplicação de materiais de revestimento, visando proteger as superfícies dos componentes. O desenvolvimento de materiais para revestimento passa necessariamente por uma avaliação do comportamento destes materiais quando submetidos ao desgaste abrasivo. O objetivo deste trabalho foi avaliar a resistência à abrasão, por meio de ensaio de roda de borracha, realizado segundo a norma ASTM G65, de três ligas metálicas. A primeira constituída do sistema Fe-Cr-C (carboneto de cromo), a segunda de Fe-Cr-C com adição de nióbio e boro (nono carbonetos) e a terceira de Fe-Cr-C com adição de nióbio, boro, molibdênio, vanádio e tungstênio (carbonetos complexos). Os revestimentos foram aplicados em chapas de aço carbono pelo processo de soldagem com arame tubular auto protegido (FCAW). Com o propósito de identificar os constituintes que influenciam na resistência ao desgaste do revestimento, as amostras foram analisadas microscopicamente pelos métodos ópticos e via microscopia eletrônica de varredura. Os resultados mostraram que a liga constituída pelo sistema Fe-Cr-C que contém os elementos nióbio, boro, molibdênio, vanádio e tungstênio (carbonetos complexos) apresentou maior resistência ao desgaste.

Palavras-chave: Revestimento duro, Desgaste abrasivo, Arame tubular auto protegido (FCAW), Ensaio roda de borracha, Liga Fe-Cr-C.

1. INTRODUÇÃO

O fenômeno do desgaste está presente nas diversas operações industriais. Em função desta condição inerente a muitos processos, torna-se um fator relevante de aumento de custos produtivos, gerado pela necessidade de constante substituição de materiais, peças e equipamentos que se deterioram por meio do desgaste. Com o objetivo de diminuir os custos com a substituição de materiais, é frequente a busca por soluções que aumentem a vida útil de peças submetidas ao desgaste, seja por meio da modificação da composição dos materiais, pela alteração da geometria ou mesmo por alguma alteração de parâmetros de processo. Contudo, a maioria das iniciativas envolve métodos de tentativa e erro, o que, em escala industrial, pode tornar o desenvolvimento muito oneroso, comprometendo a competitividade em custos da indústria.

Zun-Gahr (1987) define o desgaste como um dano gerado nas superfícies sólidas, envolvendo perda progressiva de material devido ao movimento relativo entre uma superfície e um material cortante.

Segundo Budinski (1988), a abrasão consiste no desgaste produzido por partículas duras ou protuberâncias, irregularidades de uma superfície, forçadas contra uma superfície sólida e se movendo ao longo dela. Trata-se de um dos modos de desgaste mais presentes e talvez por isso muito estudado, especialmente em aplicações industriais.

Por essas definições, pode-se identificar a abrasão como o modo de desgaste predominante quando há o contato direto entre superfícies metálicas e o minério.

A correta caracterização da atuação dos mecanismos de desgaste é um pré-requisito para a seleção adequada de materiais e, conseqüentemente, a otimização dos custos. Daí surge a necessidade de se estudar os mecanismos de desgaste, caracterizando a complexidade de tribosistemas atuantes, definindo critérios técnicos para a seleção de materiais para revestimento.

Ligas à base de ferro com concentrações de cromo e carbono que formam grandes volumes de carbonetos duros na microestrutura, são frequentemente utilizadas como revestimentos superficiais em componentes sujeitos ao desgaste, devido a suas propriedades de resistência conseguidas a um baixo custo (Choteborsky *et al.*, 2009).

As ligas Fe-Cr-C são amplamente utilizadas nas indústrias de mineração e processamento de minerais, onde é necessária alta resistência ao desgaste por abrasão (Wang e Li, 2010).

Este trabalho tem por objetivo, analisar a resistência ao desgaste de ligas constituídas pelo sistema Fe-Cr-C submetidas às solicitações de esforço abrasivo, presente em sistemas de transferência de minério de ferro. Três tipos de ligas compostas de carbonetos, aplicadas em chapas de aço ASTM-A36 por meio de processos de soldagem serão analisadas comparativamente. O método de ensaio utilizado será o de abrasão em roda de borracha, conforme a norma ASTM-G65.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Três tipos diferentes de materiais com perfil de boa resistência ao desgaste abrasivo a baixas tensões foram selecionados para este trabalho. O revestimento das placas de desgaste foi feito por processo de soldagem com arames tubulares auto-protegidos (FCAW) de 2,8 mm de diâmetro, utilizando uma fonte de energia do modelo LAF 1250, marca ESAB. Esta fonte de soldagem é acoplada a um robô equipado com sistema de controle lógico programável (PLC) do modelo CAB 300 (ESAB), contendo um cabeçote de soldagem.

A soldagem de cada liga selecionada foi efetuada em camada única em dois passes, com cordões de 2740 mm de comprimento por 30 mm de largura, com os mesmos parâmetros de soldagem, em chapas de aço A36 de 7,0 x 1500 x 2950 mm. Durante o processo de soldagem, as chapas foram postas sobre uma mesa resfriadora, para controle das propriedades do metal depositado, entre elas, a microestrutura. A Figura 1 ilustra de forma esquemática, o processo de deposição da solda durante a fabricação das placas de desgaste.

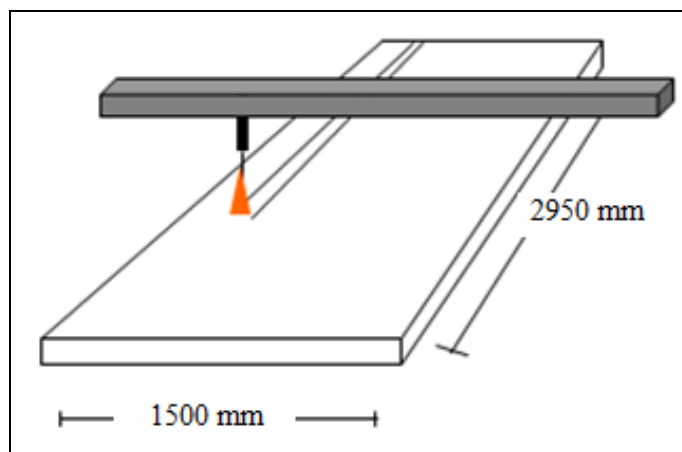


Figura 1. Desenho esquemático da aplicação do revestimento por solda nas chapas A36 (Eutectic, 2000).

Foram obtidas três placas de desgaste, formadas por uma chapa de aço A36 de 7 mm de espessura, e 5 mm de revestimento, totalizando 12 mm de espessura.

A primeira liga metálica (A) é constituída do sistema Fe-Cr-C, a segunda liga (B) constituída de Fe-Cr-C-Nb-B e a terceira liga (C) constituída de Fe-Cr-C-Nb-Mo-V-W. Totalizando três diferentes ligas compostas de carbonetos de cromo, nanocarbonetos e carbonetos complexos, respectivamente. A Tabela 1 apresenta a composição química das ligas A, B e C dos revestimentos ensaiados, bem como o valor de dureza Rockwell C das mesmas.

Tabela 1. Composição química e dureza Rockwell das ligas A, B e C, utilizadas nos revestimentos.

Liga	Sistema	C	Cr	Si	Nb	B	Mo	Mn	W	V	Fe	Dureza (HRC)
A	Fe-Cr-C	3,05	20,9	0,41	—	—	—	0,2	—	—	Saldo	50
B	Fe-Cr-C-Nb-B	3,1	19,0	0,5	5,0	0,6	—	0,1	—	—	Saldo	68
C	Fe-Cr-C-Nb-Mo-V-W	3,2	20,5	0,44	2,0	—	3,0	0,2	2,0	1,1	Saldo	62

Fonte: Eutectic.

Realizou-se o procedimento de corte dos corpos de prova a partir da região central das placas, em um equipamento de corte a plasma CNC. Para usinagem dos corpos de prova, utilizou-se uma fresadora de topo e uma retífica plana de precisão com rebolo abrasivo, para obter-se uma superfície uniforme, conforme norma ASTM G65 (2010). A Figura 2 apresenta uma foto de um dos corpos de prova obtidos para o ensaio de roda de borracha.



Figura 2. Foto de um dos corpos de prova preparado para ensaio de roda de borracha.

O ensaio de desgaste foi realizado segundo a norma ASTM G65, no qual aplica-se uma rotação a um disco metálico revestido por borracha e o mesmo entra em contato com os corpos de prova que permanecem estáticos, e um material abrasivo flui por entre ambos, gerando um desgaste abrasivo na camada de revestimento duro.

Os corpos de prova foram ensaiados segundo o procedimento A da norma ASTM G65 (2010), em um equipamento do tipo roda de borracha. Esse equipamento é constituído por um conjunto motor-variador de velocidade, conectado a uma roda metálica sobre a qual é fixada um anel de borracha. Na parte superior do equipamento é colocado o reservatório de abrasivo (areia), que por meio de dutos, é escoado com uma taxa fixada de 300 g/min até a interface roda de borracha/amostra, por meio da ação da força da gravidade. Um braço de alavanca é posicionado à frente da roda de borracha com a finalidade de fixação do corpo de prova e da aplicação da carga de ensaio. A Figura 3 apresenta de forma esquemática o equipamento.

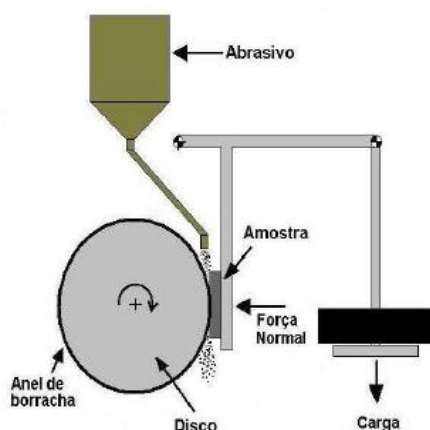


Figura 3. Desenho esquemático do ensaio roda de Borracha.

A Figura 4 apresenta o equipamento utilizado nos ensaios de desgaste.



Figura 4. Foto do equipamento utilizado no ensaio de abrasão por roda de borracha.

A norma ASTM-G65 estabelece uma força exercida pelo corpo de prova sobre a roda de 130 N, e a rotação da roda de borracha foi mantida fixa em 200 rpm quando em movimento e pressão de ensaio. O número total de rotações para interromper o ensaio foi fixado em 6000 revoluções. Os demais parâmetros estão descritos na Tab. 2.

Tabela 2. Parâmetros do ensaio de roda de borracha segundo a Norma ASTM-G65.

Parâmetros de Ensaio roda de borracha – ASTM G65						
Duração de cada teste (min)	Carga aplicada (N)	Velocidade da roda (rpm)	Número de revoluções	Diâmetro da roda (mm)	Granulometria da areia	Dureza da borracha (shore)
30	130	200	6000	228,5	50/70	60

Foi utilizada uma roda de borracha clorobutil com diâmetro externo inicial de 228,5 mm, e dureza de 60 Shore A. A dureza da borracha foi medida em vários pontos, antes e depois dos ensaios, não sofrendo variações significativas.

O sistema de peneiramento da areia para classificação consiste de duas peneiras de aço inoxidável sobrepostas, com malhas número 50 e 70, segundo a norma AFS. Tais medidas de verificação e controle das variáveis do teste, como a dureza da borracha e a granulometria da areia são importantes para assegurar a repetibilidade dos resultados.

Foram testadas 05 amostras de cada um dos três tipos de liga, com duração de trinta minutos de teste no abrasômetro de roda de borracha, para cada corpo de prova.

Com o propósito de apresentar uma descrição mais detalhada dos resultados, foram realizadas análises via microscópica óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV) destes materiais, buscando identificar uma correlação entre a microestrutura e a performance dos materiais quando submetidos à abrasão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 ilustra imagens de MEV da amostra da liga A (Carboneto de Cromo).

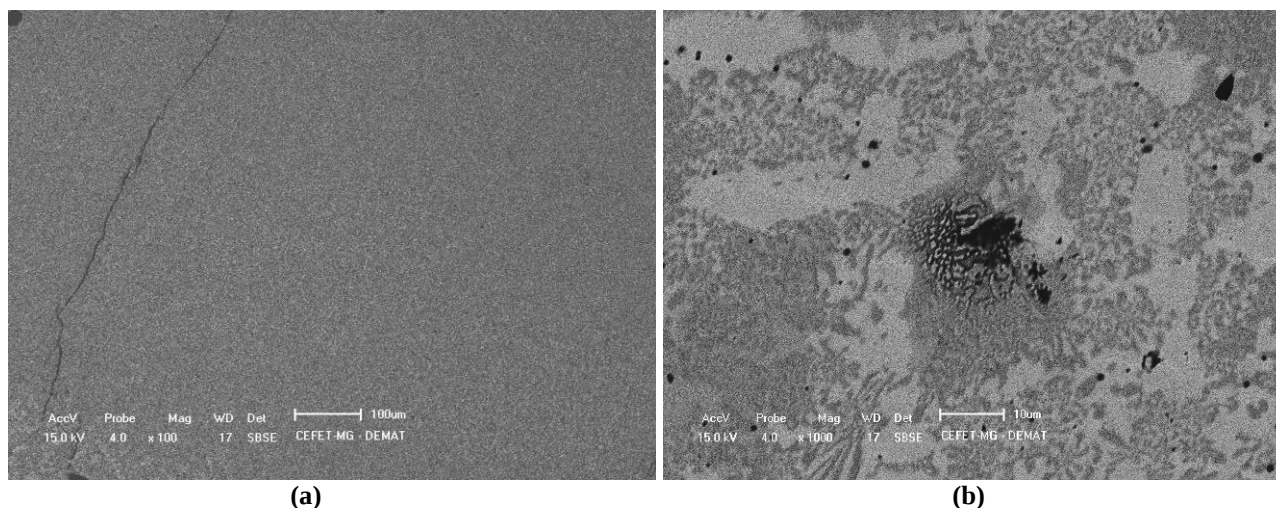


Figura 5. Imagens de MEV da liga A (Carboneto de Cromo) com ampliações de 100X (a) e 1000X (b).

Observa-se as partículas grandes dos carbonetos de cromo que se formam, dispersos na matriz.

A Figura 6 ilustra imagens de MEV da amostra da liga B (nano-carbonetos).

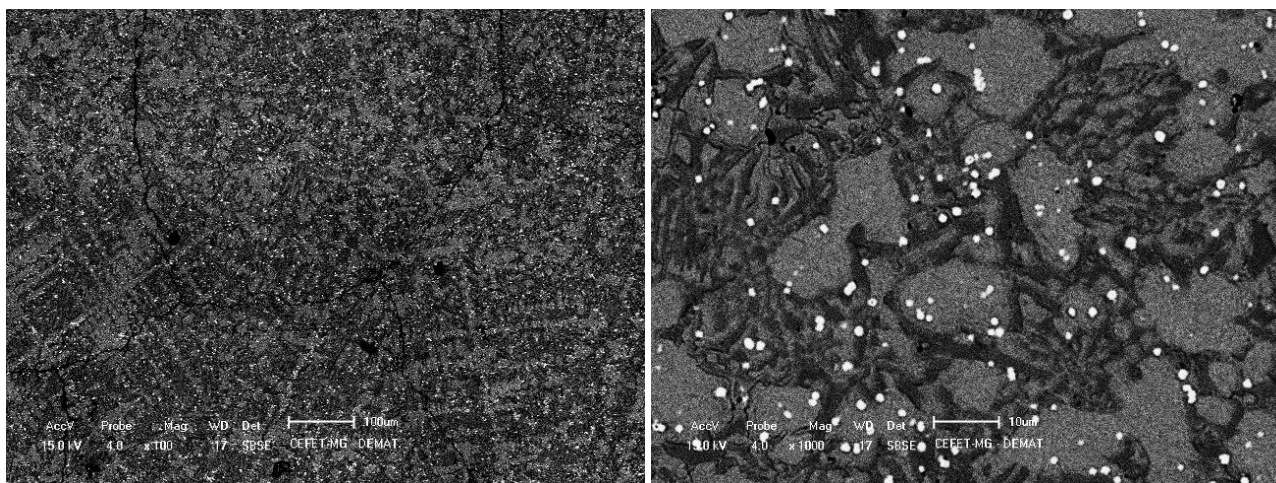


Figura 6. Imagens de MEV da liga B (nano-carbonetos) com ampliações de 100X (a) e 1000X (b).

Nota-se que a microestrutura é composta por nano-carbonetos (pontos claros) de cromo, nióbio e boro. A Figura 7 ilustra imagens de MEV da amostra da liga C (carbonetos complexos).

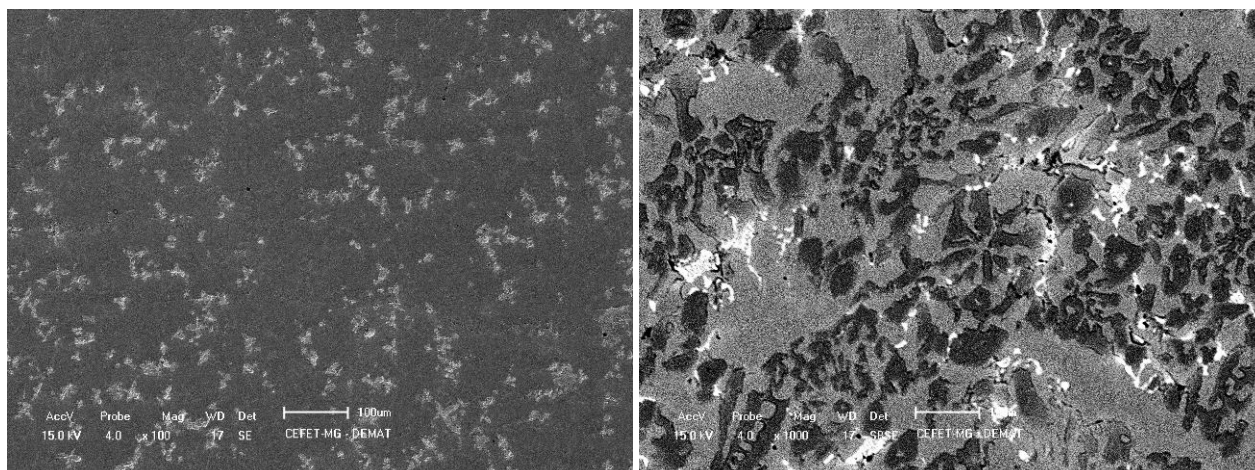


Figura 7. Imagens de MEV da liga C (carbonetos complexos) com ampliações de 100X (a) e 1000X (b).

Observa-se a microestrutura formada por carbonetos de cromo, nióbio, molibdênio, vanádio e tungstênio. A Tabela 3 apresenta os resultados do teste de desgaste abrasivo por roda de borracha.

Tabela 3. Resultados da perda de massa média (em mm³) do ensaio de roda de borracha das ligas A, B e C.

Revestimento	Média	Desvio padrão
Liga A	18,25	± 5,26
Liga B	11,92	± 9,53
Liga C	9,76	± 4,18

A liga A obteve o pior resultado nos ensaios de desgaste por abrasão seguido da liga B e C, essa última apresentou melhor resultado.

Um detalhe a ser observado nesta análise é que a amostra B apresentou duas amostras com resultados muito distantes das demais amostras do mesmo material, gerando um desvio padrão relativamente alto (9,53), aproximadamente o dobro dos outros grupos de materiais, respectivamente 5,26 e 4,18 para as amostras das ligas A e C. Esta distorção pode ter como causa a severa formação de trincas, no revestimento desta liga, gerando uma variabilidade alta nos volumes de material removido durante o teste.

A Figura 8 ilustra a trilha de desgaste produzida no ensaio de abrasão por roda de borracha na liga A.



Figura 8. Imagem de MEV da trilha de desgaste na liga A.

O motivo da liga A ter apresentado menor resistência ao desgaste abrasivo, pode estar associado, segundo Fiore (1983), ao fato do micro trincamento e fragmentação dos grandes carbonetos primários, que podem atuar como abrasivos, promovendo sulcamento e riscamento na superfície da liga depositada.

A Figura 9 ilustra a trilha de desgaste produzida no ensaio de abrasão por roda de borracha na liga B.

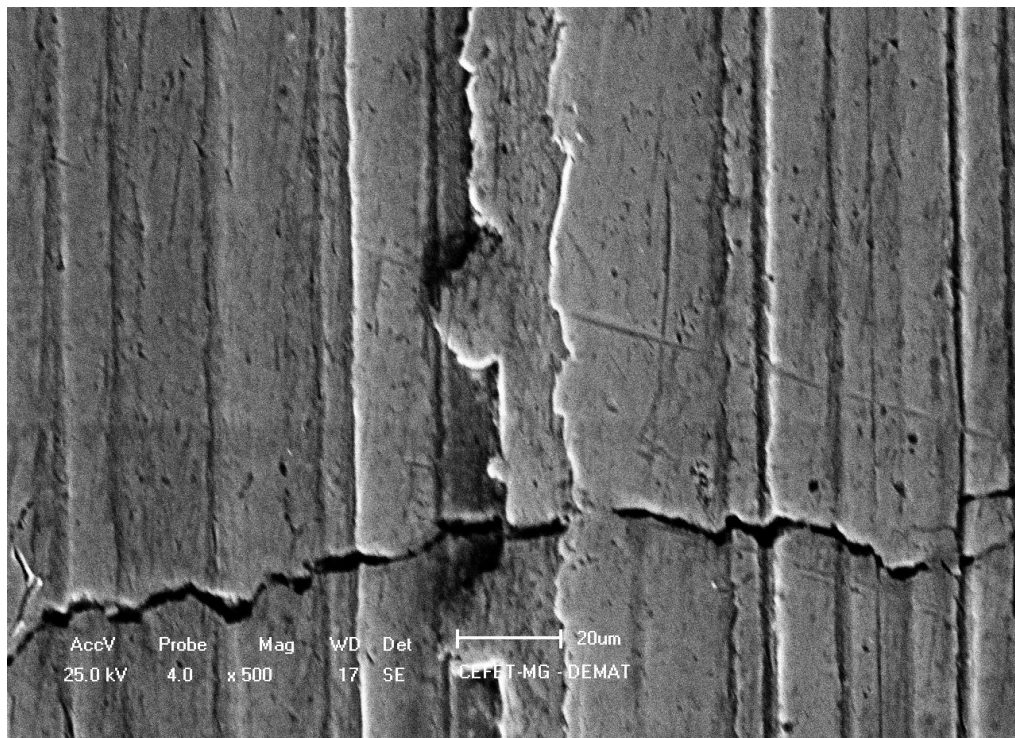


Figura 9. Imagem de MEV da trilha de desgaste na liga B.

A Figura 10 ilustra a trilha de desgaste produzida no ensaio de abrasão por roda de borracha na liga C.

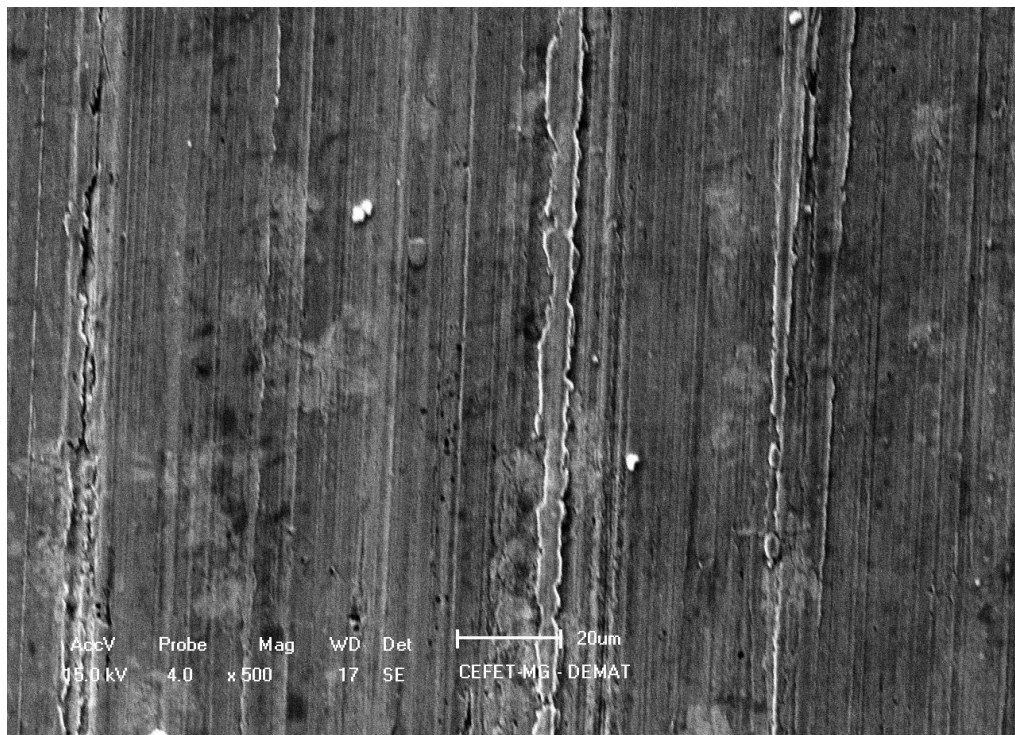


Figura 10. Imagem de MEV da trilha de desgaste na liga C.

Os resultados mostraram que os principais mecanismos de desgaste atuantes, foram provocados por micro-sulcamento e micro-riscamento nas superfícies das ligas depositadas.

A maior resistência ao desgaste abrasivo das ligas C e B deve estar associada, especialmente à presença de elementos como nióbio e boro na estrutura, elementos que contribuem significativamente para uma microestrutura com características específicas na resistência ao desgaste abrasivo a baixas tensões (Gregory, 1980). Além do que, a configuração microestrutural dos nano-carbonetos e carbonetos complexos deve promover um melhor preenchimento na estrutura, reduzindo a perda de massa por abrasão a baixa tensão.

A Figura 12 ilustra imagens via microscopia óptica de amostras das liga A (a), B (b) e C (c) respectivamente.

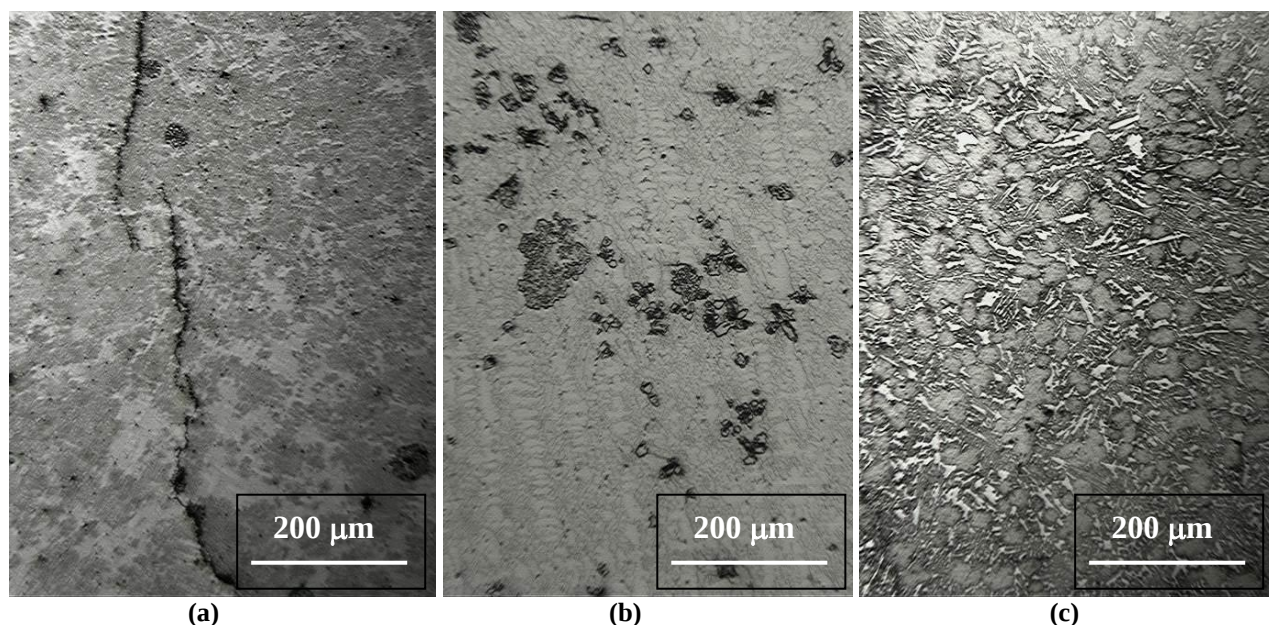


Figura 11. Imagens via microscopia óptica de amostras das liga A (a), B (b) e C (c) respectivamente.

Observa-se na microestrutura da liga C, a distância entre os carbonetos, e a maior quantidade dos mesmos em relação às outras ligas. Wang e Li (2010) relataram que uma grande quantidade de carbonetos dispersos na matriz encurta a distância entre cada uma das partículas dos carbonetos. Esse fato favorece a resistência do material ao desgaste abrasivo.

Outra característica importante a se destacar é a dureza destes materiais. As ligas A, B e C apresentaram dureza média de 50 HRC, 68 HRC e 62 HRC, respectivamente. Para aplicações onde atua o desgaste por abrasão a baixa tensão, o fator microestrutural é mais importante que o a dureza superficial, contudo, é relevante observar que há certa congruência entre o comportamento da dureza dos materiais com suas respectivas microestruturas, em relação aos resultados do ensaio de abrasão.

Para Budinski (1988), a microestrutura exerce influencia diretamente na taxa de abrasão. E a presença de microconstituintes duros contribui para a redução do desgaste.

De acordo com Buchely *et al.* (2005), um fator importante a ser observado na resistência ao desgaste, é a orientação dos carbonetos. No caso da liga C, como os carbonetos complexos não possuem orientação definida, este fator favorece a microestrutura da liga, promovendo uma maior resistência ao desgaste.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados dos ensaios e nas pesquisas realizadas neste trabalho, pode-se concluir que:

As ligas B (nano-carbonetos) e C (carbonetos complexos) apresentaram os melhores resultados em relação à resistência à abrasão a baixas tensões, quando comparadas à liga A (carboneto de cromo).

Os valores de perda de volume obtidos por meio dos ensaios de abrasão a baixas tensões, proposto pela ASTM G 65, se mostraram adequados à avaliação comparativa da resistência aos danos abrasivos dos materiais ensaiados.

Os resultados deste trabalho servem como referência na seleção de materiais que proporcionem maior resistência aos danos abrasivos.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CEFET MG pelo apoio para participação e apresentação do trabalho no congresso.

6. REFERÊNCIAS

- ASTM-G65, 2010. Disponível em: <<http://www.astm.org/Standards/G65.htm>>. Acesso em: 18 de abril de 2015.
- Buchely, M. F.; Gutierrez, J. C.; León, L. M., Toro, A., 2005, "The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys", Wear, Vol. 259, pp. 52-61.
- Budinsk, Kenneth G., 1988, "Surface Engineering for wear resistance", New Jersey: Prentice Hall.
- Eutectic, 2000, "Desgaste por Abrasão", São Paulo, SP, 49 p.
- Choteborsky, R.; Hrabec, P.; Muller, M.; Valek, R.; Savkova, J.; Jirka, M., 2009, Effect of carbide size in hardfacing on abrasive wear", Res. Agr. Eng., Vol. 55, pp. 149,158.
- Fiori, N. F., 1983, "The Effect of Carbide Volume Fraction on Low Stress Abrasion Resistance of High Cr-Mo White Cast Irons", Wear, Vol. 84, pp. 313-325,
- Gregory, E. N., 1980, "Selection of Materials for Hardfacing", Welding Surfacing and Hardfacing, The Welding Institute, 88p.
- Zum-Gahr, K. H., 1987, "Microstructure and wear of materials", Tribology series, v. 10. Amsterdam: Elsevier.
- Wang, Q.; Li, X., 2010, "Effects of Nb, V and W on microstructure and abrasion resistance of Fe-Cr-C hardfacing alloys", Welding Journal, pp. 133-139.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN THREE COATINGS FORMED BY ALLOY METALLIC ESTABLISHED BY THE SYSTEM Fe-Cr-C BY ABRASION TEST IN THE RUBBER WHEEL

Abstract. The wear phenomenon is one of the main factors that influence the cost increase in the mineral processing industries. The abrasive wear resistance is a characteristic required for the application of coating materials to protect the surfaces of the components. The development of materials for coating necessarily involves an assessment of the behavior of materials when subjected to abrasive wear. The objective of this study was to evaluate the abrasion resistance through rubber wheel test, performed according to ASTM G65, three metal alloys. The first consists of Fe-Cr-C system (chromium carbide), the second Fe-Cr-C with addition of niobium and boron (nano-carbides) and third Fe-Cr-C with added niobium, boron, molybdenum, vanadium and tungsten (complex carbides). The coatings were applied to carbon steel sheets by the welding process with self protected cored wire. In order to identify the components that influence the wear resistance of the coating, the samples were analyzed microscopically by optical methods and via scanning electron microscopy. The results showed that the alloy constituted by the Fe-Cr-C system that contains the elements niobium, boron, molybdenum, vanadium and tungsten (complex carbides) showed better wear resistance.

Keywords: Hard coating, abrasive wear, self-protecting cored wire, rubber wheel test, Fe-Cr-C Alloy.