

CORRELAÇÃO ENTRE A MICROESTRUTURA E O DESGASTE ABRASIVO DE LIGAS FERROSAS PARA SOLDA DE REVESTIMENTO DURO PARA USO EM CONDIÇÕES ABRASIVAS SEVERAS ¹

José Britti Bacalhau ², Nelson Guedes de Alcântara ³, Edmilson Otoni Correa ⁴

O presente trabalho contribui para o entendimento do efeito da adição de elementos formadores de carbonetos Nb e V sobre a microestrutura e a resistência ao desgaste de ligas de revestimento duro ferrosas, depositadas por soldagem, em comparação com uma liga comercialmente utilizada na atualidade, as quais foram projetadas para revestir componentes sujeitos a um desgaste abrasivo severo. O trabalho inclui a caracterização microestrutural, e testes de abrasão e compressão cíclica. O principal objetivo foi estabelecer uma relação entre a microestrutura e as propriedades de desgaste abrasivo. Resultados da caracterização microestrutural da liga ferrosa com a adição de Nb e V (Integra 750) mostraram que a microestrutura consiste de carbonetos NbC distribuídos numa matriz austenítica contendo carbonetos M_3C e ilhas de eutético γ/M_7C_3 . Resultados de microanálise indicaram que o vanádio se direcionou para os carbonetos e para a matriz. Testes de abrasão a baixa e a alta tensão e de compressão cíclica mostraram que esta microestrutura proporcionou uma resistência ao desgaste superior àquela das ligas Fe-C-Cr (HCO) convencionais e uma boa combinação entre resistência ao desgaste e tenacidade.

Palavras-Chave: Soldagem, Desgaste, Revestimento Duro.

- 1- 6º ENEMET, 24 a 28 de Julho de 2006 – Rio de Janeiro – RJ. Código: **11060**.
- 2- José Britti Bacalhau: Aluno de iniciação científica, cursando o 4º ano de Engenharia de Materiais na Universidade Federal de São Carlos - UFSCar.
- 3- Prof. Dr. Nelson Guedes de Alcântara - Ph.D. em Tecnologia de Soldagem pela Cranfield University, Inglaterra (1982), Professor Adjunto IV do DEMa - UFSCar.
- 4- Edmilson Otoni Correa: Doutor em Engenharia de Materiais (Metalurgia) pela UFSCar.

1. INTRODUÇÃO

Em diversos ramos industriais, o desgaste abrasivo é, na maioria das vezes, o principal responsável por danos superficiais em equipamentos (figura 1). Estes danos, ainda que não catastróficos, reduzem consideravelmente a eficiência operacional de um equipamento provocando um aumento das perdas de energia, do consumo de óleo e das taxas de substituição e/ou recuperação de componentes.



Figura 1. Rolo pulverizador de ferro fundido branco com desgaste brando nas interseções (A) e desgaste mais intenso nas áreas do segmento (B) a espera da solda de revestimento(1).

Um método de combate ao desgaste abrasivo e de recuperação de componentes desgastados bastante eficiente e que, geralmente, envolve custos mais baixos é tecnicamente chamado de “revestimento”. Este método consiste na deposição de uma liga especial resistente ao desgaste na superfície sujeita à deterioração. O revestimento normalmente é obtido pela deposição de cordões de solda na superfície (substrato), denominando-se “revestimento duro”.

Com base no que foi relatado acima, o presente trabalho tem como objetivo:

- Caracterizar mecânica e microestruturalmente uma liga ferrosa desenvolvida recentemente de revestimento duro, e verificar a influência da microestrutura sobre a resistência ao desgaste abrasivo a 3 corpos das mesmas tendo como base uma liga comercial já conhecida.

Desgaste

De um modo geral, “desgaste” pode ser definido como a perda progressiva de material da superfície de um corpo, provocada pelo movimento relativo desta superfície em relação a uma ou várias outras substâncias em contato. Dentre os tipos de desgaste existentes o desgaste abrasivo pode ser definido como o desgaste que ocorre quando partículas duras angulares ou asperidades duras penetram na superfície do metal ou substrato, em relação à qual estão em movimento e, subseqüentemente, remove metal na forma de lascas alongadas. O desgaste abrasivo é tipicamente classificado de acordo com o tipo de contato e com o ambiente de contato. Os tipos de contato incluem desgaste de “2-corpos” e “3-corpos” (figura 2).

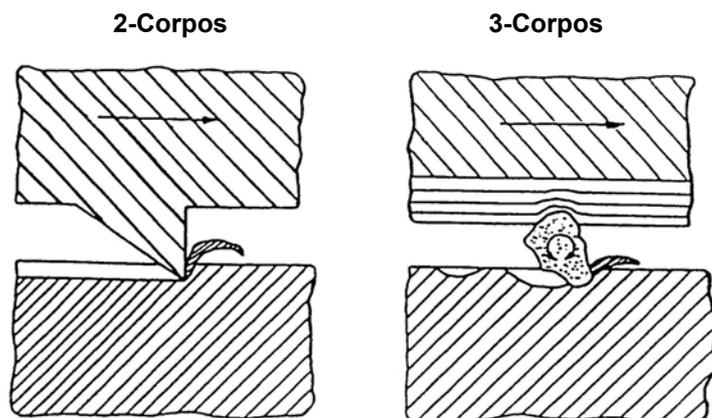


Figura 2. Representação esquemática de desgaste a 2 e 3- corpos (2).

Ensaio de desgaste abrasivo

Ensaio de abrasão a alta tensão:

O ensaio de pino sobre disco é o mais usado para testes de abrasão à alta tensão (3). Um pino feito da liga a ser ensaiada é friccionado contra uma roda abrasiva (Figura 3). A carga aplicada ao pino determina o grau de abrasão a altas tensões.

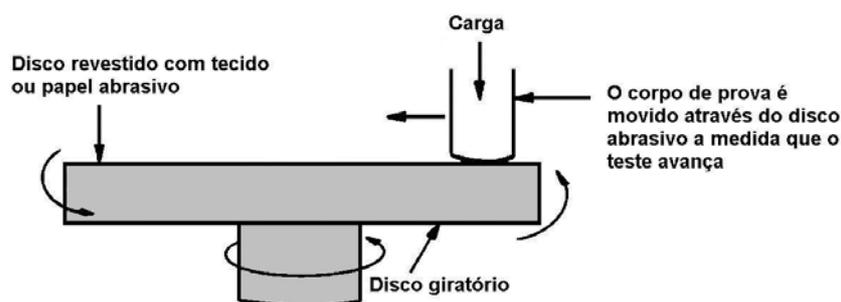


Figura 3. Representação esquemática de um equipamento de ensaio de abrasão a alta tensão tipo pino sobre disco (3).

Ensaio de abrasão a baixa tensão:

Já para abrasão à baixa tensão, o ensaio roda de borracha (figura 4) é o mais largamente usado para classificar materiais presentes em equipamentos como: ferramentas para agricultura, mesas e rolos de moinhos e equipamentos de construção (3). Este teste tem seu procedimento estabelecido pela norma ASTM G65-00 e consiste em riscar um corpo de prova retangular com areia de tamanho de grão e composição controlados.

Influência dos elementos de liga na microestrutura das ligas Fe-Cr-C

- Ligas Fe-Cr-C com adição de Nb

A adição de nióbio nas ligas Fe-Cr-C altera consideravelmente a microestrutura, pois o nióbio forma nestas ligas os carbonetos NbC, de elevada dureza, que passa a coexistir com os outros carbonetos do sistema Fe-Cr-C, como os M_7C_3 e M_3C numa matriz austenítica ou martensítica.

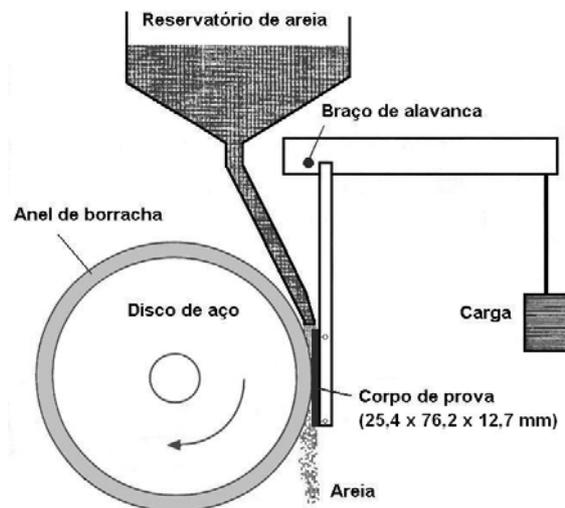


Figura 4. Esquema simplificado do equipamento para ensaio de desgaste abrasivo à baixa tensão descrito na norma ASTM G65 (5).

A influência do nióbio nestas ligas, conforme Atamert (4), é a de absorver grandes quantidades de carbono para formação do carboneto NbC e diminui a possibilidade de se obter uma grande quantidade de carbonetos M_7C_3 .

- Ligas Fe-Cr-C com adição de V

A adição de vanádio em ligas de revestimento duro Fe-Cr-C é de grande interesse devido à alta dureza dos seus carbonetos (2660 HV) (6). Segundo Borik et. al (7), as microestruturas de ligas contendo vanádio apresentaram carbonetos dendríticos V_4C_3 numa matriz de austenita, a qual provavelmente se transformou parcialmente em martensita. Essas ligas apresentaram a melhor resistência ao desgaste abrasivo em relação a outras com adição somente de cromo, devido à alta fração volumétrica de carbonetos V_4C_3 duros.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Partido de ligas soldadas com arames tubulares a base de Fe-Cr-C, com adição de elementos de liga formadores de carbonetos como Nb e V (tabela 1), confeccionados na Welding Alloys – UK foram realizadas as seguintes atividades:

- Ensaios de resistência à abrasão a baixa tensão para cada liga pelo método de roda de borracha de acordo com o procedimento A da norma ASTM G65-00e1.
- Testes de desgaste abrasivo a alta tensão (pino sobre lixa), com a finalidade de se obter no final do trabalho, parâmetros de resistência ao desgaste das ligas mais próximos da realidade de sua operação. Durante o teste, os corpos de prova foram carregados verticalmente e por gravidade com uma massa de 320g e movidos sobre um disco com velocidade de rotação de 45 rpm, este estava revestido com uma lixa de SiC de 180 mesh, o número máximo de revoluções foram de 600 rpm.
- Ensaios de compressão cíclica usando máquina de teste servo-hidráulica Mayes de capacidade de 100 KN. Este teste visou determinar, qualitativamente, qual liga apresentava maior resistência à ruptura quando submetida a cargas de compressão variáveis.

Tabela 1- Composição química do metal de solda nas camadas superiores do revestimento duro.

Arame	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Ni	% Nb	% Ti	% V	% W
Integra 750	4,50	1,10	1,13	8,50	2,4	10,20	0,13	2,64	-
HC-O	4,85	0,83	1,1	24,50	-	-	-	-	-

- Caracterização microestrutural via MO e MEV de corpos de prova da solda de revestimento, retirados da seção transversal do metal de base, perpendicularmente à direção de soldagem.
- Ensaios de dureza Vickers com carga de 30 Kg, e ensaios de micro-dureza das fases e da matriz de cada liga, com cargas variando de 10 a 100g.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As figuras 5 e 6 fornecem os resultados de desgaste das ligas em baixa tensão e alta tensão.

Apesar da maior dureza, a liga hipereutética HCO (Fe-Cr-C) com aproximadamente 25% de Cr, essa apresentou a menor resistência ao desgaste. Isto pode ser atribuído à fratura (microtrincamento) e arrancamento de partículas (figura 7a). Alguns autores (8,9) identificaram outros mecanismos de desgaste que podem atuar na degradação microestrutural destas ligas tais como formação de pites e a ação de sulcamento pelos próprios fragmentos das partículas que se soltam.

Pode ser visto que a liga Integra 750 apresentou uma resistência ao desgaste à baixa tensão bem superior ao da liga HCO. Nota-se também pela figura 6 que, em altas tensões, o desempenho é bem próximo do desempenho da liga convencional HCO.

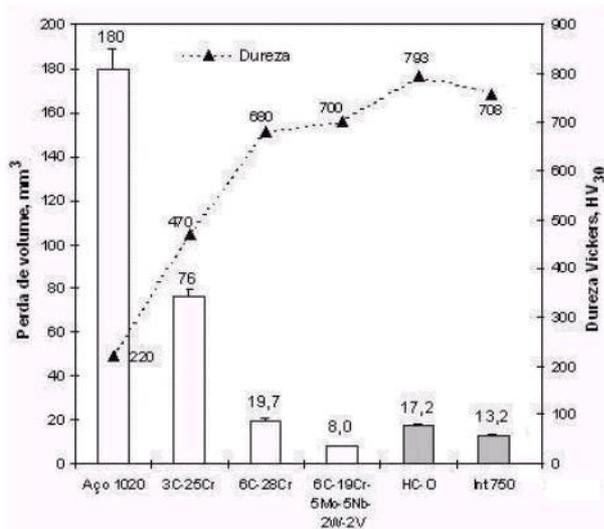


Figura 5. Resultados de teste de abrasão em Roda de borracha.

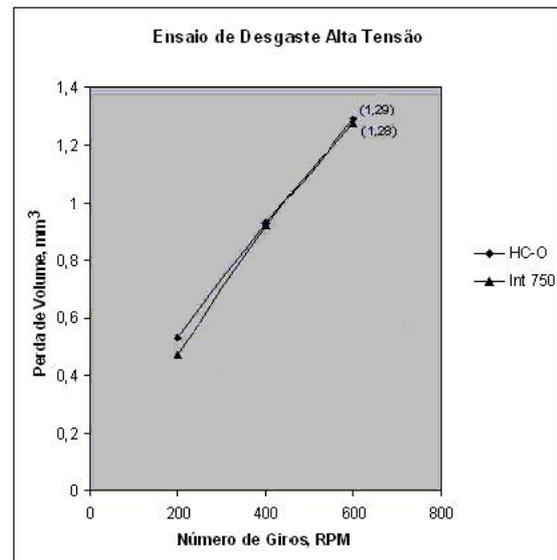
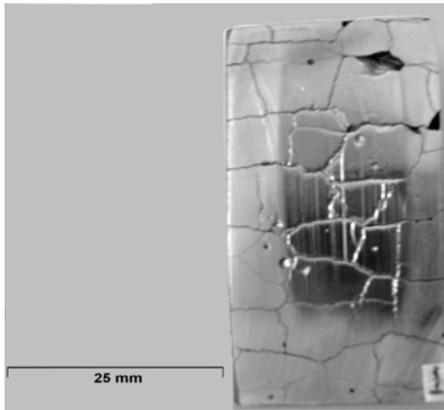
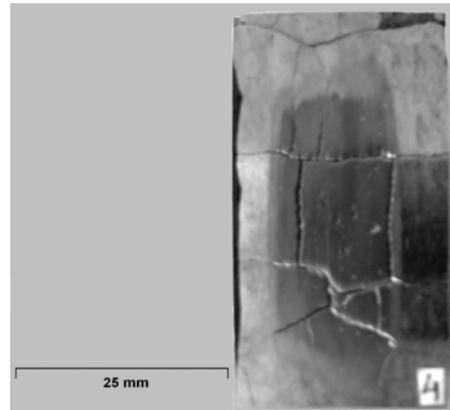


Figura 6. Resultados do teste de desgaste Pino sobre Lixa.



(a) Liga HC-O



(b) Liga Integra 750

Figura 7. Corpos de prova de desgaste mostrando as trincas de alívio de tensão.

Em relação ao ensaio de compressão cíclica tabela 2 mostra os resultados.

Tabela 2- Resultados do carregamento cíclico das ligas

* Faixa de carga / Tensão de compressão	Ciclos cumulativos até a fratura	
	HC-O	Integra 750
31 KN / 1,50 KN/mm ²	17620	17620
38 KN / 1,75 KN/mm ²	27621	27621
45 KN / 2,00 KN/mm ²	36691	36691
52 KN / 2,25 KN/mm ²	45701	45701
58 KN / 2,50 KN/mm ²	54711	53431
64 KN / 2,75 KN/mm ²	57521	-

* Faixa de carga = $P_{max} - P_{min}$

E torna-se importante destacar que:

- O melhor desempenho da liga HCO pode ser atribuído, principalmente à sua maior resistência à compressão e à ausência quase que completa de defeitos nos corpos de prova. Mas pela tabela podemos notar que as duas ligas apresentam uma resistência à compressão cíclica suficiente para suportar as cargas cíclicas envolvidas na trituração de rochas calcárias, por exemplo, na indústria de cimento.

Microestruturas

Liga HC-O

As figuras 8(a) e (b) são micrografias obtidas por microscopia ótica da liga de revestimento duro HC-O (camadas superiores). Como pode ser visto, a microestrutura resultante da liga é formada por grandes carbonetos M_7C_3 primários, na sua maioria na

forma de agulhas (que podem medir acima de 400 μm no comprimento) e algumas partículas hexagonais agrupadas regularmente (veja figura 8a). A fase matriz consiste numa mistura eutética de finos carbonetos M_7C_3 e austenita retida. Apesar do fato de que a microestrutura de equilíbrio abaixo de 700 °C devesse ser uma mistura de ferrita e uma grande fração volumétrica de M_7C_3 , esta microestrutura metaestável está presente na temperatura ambiente devido às altas taxas de resfriamento do processo de soldagem.

As fases presentes na liga HC-O foram determinadas quantitativamente usando um analisador de imagens e a fração volumétrica de cada fase é mostrada na tabela 3. Os resultados mostram que a fração volumétrica média da fase carboneto M_7C_3 é aproximadamente 45%. Para melhor identificar as fases presentes, realizaram-se medidas de micro-dureza das mesmas, e obtiveram-se os seguintes valores médios: 1507 HV para os carbonetos e o que esta de acordo com dados encontrados na literatura (3) e 753HV para a região eutética, esse valor encontrado está acima do esperado para a austenita 600HV pelo fato do penetrador ter abrangido a fase M_7C_3 eutético.

Tabela 3- Resultados de análise de imagem da liga HC-O

Função Estatística	Fase: M_7C_3	Área	Fase: Austenita	Área
Unidade	μm^2	%	μm^2	%
contagem	15	15	15	15
Média	129680,96	44,78	159884,50	55,22
Desvio Padrão	8177,54	2,82	8177,54	2,82

Liga Integra 750

A avaliação microestrutural da superfície polida da liga Integra 750 por microscopia ótica revelou a presença de partículas distribuídas aleatoriamente na matriz na forma de pequenas dendritas e de partículas bem finas mais arredondadas (veja figura 9). A fim de se ter uma avaliação microestrutural mais minuciosa destas partículas foi feita também uma observação desta mesma superfície polida utilizando microscopia eletrônica. A micrografia é mostrada na figura 10. A imagem revelou a presença de três fases: uma fase clara denominada A na figura, a qual é enriquecida com um ou mais elementos de número atômico alto; uma fase mais fina cinza escura, denominada B na figura e a fase matriz C cinza claro.

Após o ataque, a característica mais importante observada na liga Integra 750 é a presença de ilhas de uma fase eutética distribuídas na matriz. Esta fase pode ser vista na micrografia ótica mostrada na figura 11 e, mais claramente, nas micrografias obtidas por MEV apresentadas na figura 12 (fase denominada D) e na figura 13.

As fases indicadas nas micrografias de A–D foram determinadas graças à ferramenta de microanálises EDS do microscópio eletrônico de varedura, a figura 14 mostra o pico de fluorescência (EDS) do elemento predominante na fase A, apesar de não ser mostrado os gráficos das outras fases o mesmo procedimento foi realizado, e os seguintes resultados foram obtidos:

Fase A - Carbonetos NbC, com quantidade considerável de vanádio dissolvido nessas partículas, além de traços de cromo, ferro e titânio.

Fase B - Carboneto M_3C , com 13% de Cr e uma alta concentração de ferro (~65%), os resultados também mostraram que o vanádio foi dissolvido nesta fase em quantidade considerável embora menor do que aquela dissolvida nos carbonetos NbC.

Fase C - Austenita com um alto teor de cromo (aproximadamente 20%).

Fase D - Esta fase contém uma grande quantidade de cromo (~50%) e ferro (~36%) sugerindo a presença de carbonetos M_7C_3 . Novamente, pode-se notar a presença de vanádio nesta fase.

Na tabela 4 está representado a composição química das de B-D indicadas nas micrografias e na tabela 5 a fração volumétrica de carbonetos presentes na liga Integra 750, estimados através de um analisador de imagens.

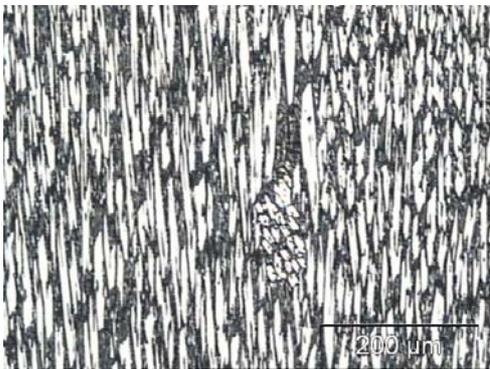


Figura 8 (a). Micrografia ótica da secção transversal da liga HC-O mostrando carbonetos M_7C_3 largos (fase clara) numa matriz eutética (fase escura)



Figura 8 (b). Mesma secção anterior em aumento maior. Pode-se notar claramente a presença das fases γ e M_7C_3 no eutético.

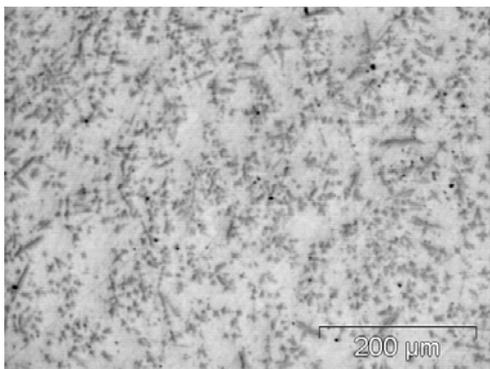


Figura 9. Micrografia ótica da superfície polida da liga Integra 750. Note partículas distribuídas aleatoriamente pela matriz

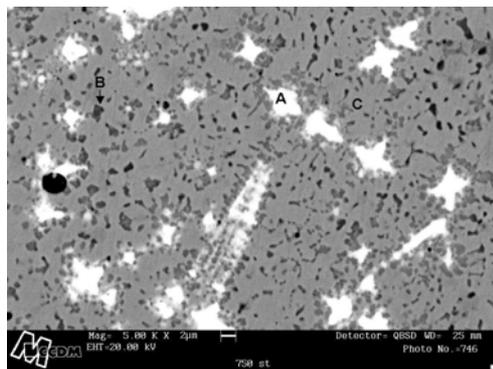


Figura 10. Micrografia eletrônica da superfície polida da liga Integra 750 mostrando três fases distintas.

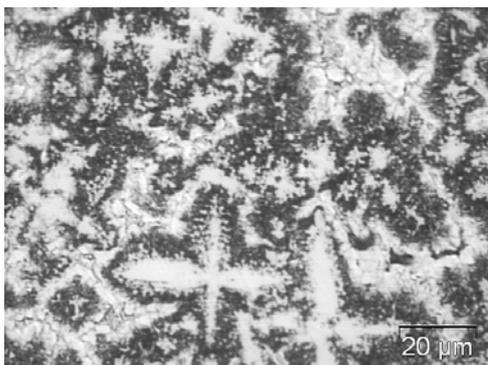


Figura 11. Micrografia ótica da liga Integra 750 após o ataque. Presença de ilhas de uma fase eutética.

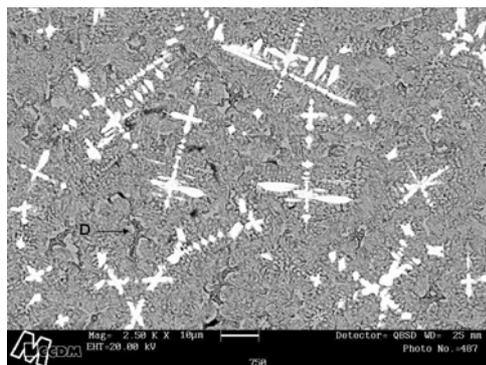


Figura 12. Micrografia eletrônica mostrando a presença da Fase D na matriz.

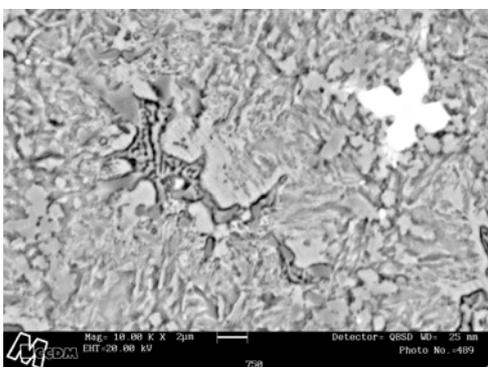


Figura 13. Micrografia eletrônica mostrando a fase D em detalhe.

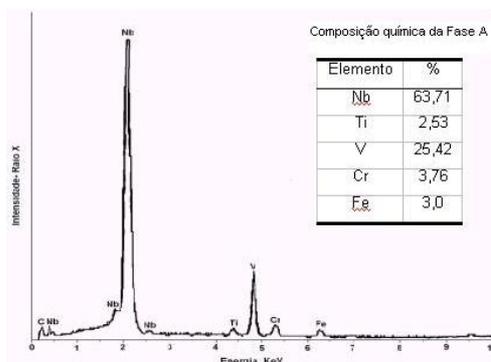


Figura 14 - Curva EDS obtido para a fase A e tabela de composição química da mesma, ignorando o teor de carbono.

Tabela 4 - Composição química obtida da fase B, C e D, ignorando o teor de carbono.

Fase	B (%)	C (%)	D (%)
Si	1,66	1,90	1,10
Nb	1,75	0,96	0,87
V	20,68	4,69	9,98
Cr	13,29	21,81	49,68
Mn	1,28	2,27	-
Fe	60,36	67,21	36,27
Ni	0,98	1,16	0,32

Tabela 5 - Fração volumétrica das fases presentes na liga Integra 750.

Função Estatística	Fase $M_7C_3 +$ Austenita		Fase $MC + M_3C$	
	μm^2	%	μm^2	%
Unidade				
Contagem	15	15	15	15
Média	58717	79,55	14945,07	20,45
Desvio	1231,95	1,67	975,24	1,32
Padrão				

4. CONCLUSÃO

O presente estudo mostrou que a liga Integra 750 apresentou uma melhor combinação entre tenacidade e resistência ao desgaste abrasivo, principalmente a baixa tensão, em relação à liga comercial HC-O. Isto pode ser atribuído à presença de carbonetos NbC finos distribuídos uniformemente numa matriz eutética composta de

austenita e M_3C bem como a ausência de carbonetos de cromo primários grosseiros. Devido a isto, esta liga se torna promissora para aplicações em componentes de moinhos verticais que, em serviço, apresentem condições de impacto leve e vibrações.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio da FAPESP pela concessão da bolsa de estudo de Iniciação Científica (Processo nº 05/51389-9).

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- (1) ELLIOT, R., Cast Iron Technology, pp.33-34, Butterworths, 1988.
- (2) ZUM GAHR, K. H., Microstructure and Wear of Materials, Elsevier, 1987
- (3) NOBLE, D.N., "Factors Which Affect Abrasive Wear Resistance of Hardfacing Weld Deposits- A Review of the Literature. The Welding Institute, 26p., Outubro, 1984.
- (4) ATAMERT, S.: Stability, Wear Resistance, and Microstructure of Iron, cobalt and Nickel-based Hardfacing alloys, Ph.D Thesis, The University of Cambridge, UK, 1988.
- (5) STEVENSON, A.N.J. & HUTCHINGS, I.M., "Development of the Dry Sand/Rubber Wheel Abrasion Test, Wear 195 (1996), pp. 232-240.
- (6) EYRE, T. S., Wear Characteristics of Metals, Source Book on Wear control Technology, ASM, 1978, pp. 1-10.
- (7) BORIK, F. & MAJETICH, J.C.: In Proc. Conf. Wear of Material 1985, Am. Soc. Mech. Eng., New York, 595, 1985.
- (8) FUJIMURA, H., KAMITO, Y., NOTOMI, A., & KINOSHITA, M. "Development of Hard Overlay Welding for High Wear Resistance, Mitsubishi Heavy Industries Ltda, Julho, 1988.
- (9) MOORE, M. A., Abrasive Wear, in Proc.Conf. Fundamentals of Friction and Wear of Materials, 4-5 October, 1980, Pittsburgh Pennsylvania, ASM.

ABSTRACT

This project contributes to the understanding of the effect of alloying elements forming carbides Nb and V on the microstructure and wear resistance of iron-based hardfacing alloys deposited by fusion welding process and, developed for cladding components subjected to severe abrasive wear. The project undertaken includes microstructural characterisation, abrasion and cyclic compression testing. Its primary purpose has been to establish the relationship between microstructure and abrasive wear properties. The microstructure of the iron-based hardfacing alloy with the addition of Nb and V (Integra 750) consists of a large volume fraction of primary niobium carbides, surrounded by a matrix composed of austenite containing M_3C carbides and islands of eutectic γ/M_7C_3 . Standard three body abrasion and cyclic compression tests showed that Integra 750 exhibits wear rates higher than those of high carbon/high chromium hardfacing deposits with higher hardness and a good combination between wear resistance and toughness.

Key-Words: Welding, Wear resistance, Hardfacing.