

Estudo comparativo da resistência ao desgaste abrasivo de baixa tensão de três ligas metálicas aplicadas em revestimento duro sobre aço manganês hadfield**Study of resistance to low tension abrasive wear of three metallic alloys applied in hard coating on hadfield manganese steel**

DOI:10.34117/bjdv6n11-004

Recebimento dos originais: 19/10/2020

Aceitação para publicação: 03/11/2020

Rodrigo Martins Minatto

Mestrando em Engenharia Metalúrgica pela Faculdade SATC

Instituição: Faculdade SATC – Criciúma - SC

Endereço: Rua Pascoal, R. Imigrante Meller, 73 - Bairro – Universitário

E-mail: rodrigo.minatto@gmail.com

Adelor Felipe da Costa

Engenheiro Mecânico Especialista pela Faculdade SATC

Instituição: Faculdade SATC – Criciúma - SC

Endereço: Rua Pascoal, R. Imigrante Meller, 73 - Bairro – Universitário

E-mail: adelor.costa@satc.edu.br

Anderson Daleffe

Dr. Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais pela UFRGS

Instituição: Faculdade SATC – Criciúma - SC

Endereço: Rua Pascoal, R. Imigrante Meller, 73 - Bairro – Universitário

E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br

RESUMO

O artigo apresenta o estudo comparativo de três ligas de revestimento duro, depositadas através do processo de soldagem MIG por arame tubular FCAW (Flux Cored Arc Welding), comercialmente indicadas para proteção contra desgaste em componentes e peças mecânicas. Os revestimentos foram aplicados sobre metal base em aço manganês ASTM A128 grau C. Os revestimentos foram caracterizados através de metalografia, ensaios de dureza, microdureza e ensaio de abrasão por roda de borracha ASTM G65-16 com o objetivo de identificar o revestimento com melhor desempenho contra o desgaste abrasivo de baixa tensão. Os resultados alcançados demonstram que a liga FeCrC+Nb(2), com microestrutura martensítica e maior teor de carbono dentre as analisadas, apresentou a maior resistência ao desgaste abrasivo de baixa tensão.

Palavras-chave: Revestimento duro, soldagem, manganês hadfield, mecanismos de desgaste, tribologia.

ABSTRACT

This paper shows a comparative study of three hard facing alloys, deposited through the MIG welding process by FCAW (Flux Cored Arc Welding) flux-cored wire, commercially indicated for protection against wear on components and mechanical parts. The coatings were applied on ASTM A128 grade C manganese steel base metal. The coatings were characterized by metallographic, hardness testing,

microhardness testing and ASTM G65-16 rubber wheel abrasion testing in order to identify the best performing coating against low tension abrasive wear. The results achieved demonstrate that FeCrC+Nb(2) alloy, with mar-tensitic microstructure and higher carbon content among the analyzed, showed the highest resistance to low tension abrasive wear.

Keywords: Hard coating, welding, manganese hadfield, wear mechanisms, tribology.

1 INTRODUÇÃO

Técnicas de revestimento duro tem sido massivamente utilizada pela indústria na expectativa de proteger e ampliar a vida útil dos componentes mecânicos expostos a mecanismos de desgaste. Novos revestimentos e materiais foram desenvolvidos com o passar dos anos focados neste objetivo. Destacam-se dentro dos revestimentos, as ligas formadoras de carbeto de cromo e de titânio, e dentre os aços o manganês Hadfield ASTM A128 grau C, liga com excelente resistência em solicitações de severo impacto. Com o objetivo de associar as características de resistência a abrasão dos revestimentos duros e resistência ao impacto do aço manganês Hadfield, o presente estudo analisará o comportamento de três ligas de revestimentos duro como mecanismo de recuperação e proteção contra o desgaste abrasivo de baixa tensão sobre o aço manganês Hadfield ASTM A128 grau C.

O desgaste é um fenômeno diretamente relacionado com a atividade produtiva. As condições e intensidade destes processos são partes integrantes da vida útil e da confiabilidade de todos os sistemas, sendo o fator mais predominante das falhas ocorridas nos componentes de máquinas e equipamentos. Tais componentes possuem diferentes estágios de falhas e normalmente não falham em uma única etapa de desgaste, mas falham pela combinação dos vários mecanismos de desgaste agindo na peça, tais como adesão, erosão, abrasão, corrosão e oxidação [1] [2].

Pode-se definir basicamente o desgaste como a remoção ou deslocamento indesejado de material, de forma progressiva de uma superfície, normalmente por atuação mecânica. Vale destacar que o desgaste abrasivo é o mecanismo mais recorrente nos processos industriais, apontado como responsável por aproximadamente 63% dos custos de recuperação de componentes mecânicos [3], [4], [5].

Em processos mecânicos ou industriais onde componentes são expostos a mecanismos de desgaste, são amplamente utilizadas as ligas de manganês Hadfield e de ferro fundido ligado ao cromo como o ASTM A-532 Classe II Tipo D, rico em carbeto de cromo de elevada dureza (1020 – 1835 HV) e alta resistência ao desgaste abrasivo [6][7].

A liga de manganês conhecida comercialmente como aço Hadfield é normalmente utilizada em aplicações associadas a desgaste e impacto. É composta por 1,2%C e 13%Mn e possui estrutura austenítica metaestável endurecendo rapidamente, quando submetida a repetidos impactos em trabalho

pesado, através do processo de encruamento. Através deste mecanismo a austenita metaestável se transforma em martensita, podendo alcançar dureza superficial de 500 HB, mantendo as propriedades originais de seu núcleo com dureza na ordem de 230 HB. Este comportamento torna essa liga muito aplicada em britadores, moi-nhos e cruzamentos de linhas férreas que requerem dureza aliada a tenacidade [8].

Conforme a norma ASTM A 128/A 128M [9], a recuperação dos componentes des-gastados em manganês pode ser efetuada através de deposição por processos de soldagem. Entretanto cuidados devem ser tomados pois seu aquecimento acima de 250°C provoca sua fragilização em virtude da precipitação dos carbonetos para o contorno de grãos. Dessa forma é essencial manter a temperatura de interpasse abaixo deste valor, dentro de uma faixa de 12mm, a partir da superfície de aplicação da solda [10] [11].

Já ligas de ferro fundido ligadas ao cromo, de acordo com a norma A 532/A 532M [7], são compostas de martensita e carbonetos de cromo com elevada dureza, superando os valores apresentados no aço manganês Hadfield. Entretanto sua baixa tenacidade torna a utilização mais restringida a solicitações de desgaste abrasivo, sem a ocorrência de impacto severos [6].

Além da utilização de materiais de alta resistência contra o desgaste, outra técnica amplamente empregada é a aplicação de revestimento duro como dispositivo de proteção, com o objetivo de estender a vida útil dos componentes mecânicos e diminuir seu custo por suas propriedades de resistência ao desgaste e corrosão [12].

Para que a aplicação desta técnica possa alcançar os resultados esperados, além de revestimentos que possibilitem a formação de carbonetos duros na liga depositada, é de fundamental importância a aplicação do revestimento sobre uma matriz resistente, evitando o deslocamento dos carbonetos e conferindo ao depósito uma maior resistência contra trin-cas [12].

É importante observar que apesar da relação imediata da resistência dos revestimen-tos com sua dureza, a influência das características do material para o revestimento são mui-to complexas e dependem de múltiplos fatores, sendo necessário, além das investigações em laboratório, a análise tribologica do sistema, para sua correta especificação [1].

Com o objetivo de avaliar a aplicação dos revestimentos duro sobre o aço manganês hadfield ASTM A128 grau C e indicar a liga de maior resistência ao desgaste abrasivo de baixa tensão, serão apresentados os resultados dos ensaios em laboratório de três ligas apli-cadas sobre metal base em aço manganês.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os corpos de prova utilizado para metal base foram produzidos a partir da usinagem de uma barra fundida em aço manganês Hadfield ASTM A128 grau C, com dimensão de 100x78x275mm. Foram extraídos nove corpos de prova (CP) medindo 30x12x80mm (Fi-gura 01) através de processo de usinagem.

Tabela 1: Composição química do metal base ASTM A128 grau C

C	Si	Mn	Cr	S	P	Fe
1,14	0,47	12,10	1,73	0,02	0,04	Bal.

Foram selecionadas três ligas de revestimento duro comerciais, indicadas para proteção e recuperação de peças submetidas a processos de desgaste na indústria. Foram aplica-das duas ligas com composição química similares de FeCrC+Nb e uma liga de FeCrC+Ti com deposição isenta de trincas.

Conforme Havel [10], consumíveis de aço inoxidável são indicados para soldagem por possuírem uma boa adesão e compatibilidade ao aço manganês e a diversas ligas de aço.

Dessa forma, todos os corpos de prova receberam almofada em FeCrMn+Ni (tabela 2) com 3mm de espessura e duas camadas de deposição com revestimento duro de 3mm de espessura por camada (tabela 3).

O processo de soldagem MIG por arame tubular FCAW (Flux Cored Arc Welding) foi aplicado para efetuar os depósitos. Para cada tipo de consumível foram revestidos três corpos de prova, obedecendo as mesmas características de processo e aplicação.

Tabela 2: Composição química da almofada (um passe de revestimento)

Liga	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Ti	%Fe
FeCrMn+Ni	0,08	0,9	7,0	19,2	9,0	0,03	Bal.

Tabela 3: Composição química dos consumíveis de revestimento (dois passes de revestimento)

Identificação do CP	Liga	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%Nb	%Ti	%V	%Fe
CP-A	FeCrC+Nb(1)	4,50	0,6	0,5	22,0	0,0	6,5	0,00	0,0	Bal.
CP-B	FeCrC+Ti	1,50	0,50	0,84	5,5	1,0	0,0	2,50	0,5	Bal.
CP-C	FeCrC+Nb(2)	5,50	0,30	0,30	22,0	0,0	7,0	0,00	0,0	Bal.

Os procedimentos de soldagem foram executados na empresa ICON, de Criciúma, Santa Catarina, em processo semi-automatizado, conforme aplicação e metodologia con-vencional utilizada

em grande parte dos processos industriais de revestimento duro. Os ajustes para determinação dos parâmetros de soldagem foram executados e determinados previamente em barras de teste em aço manganês hadfield.

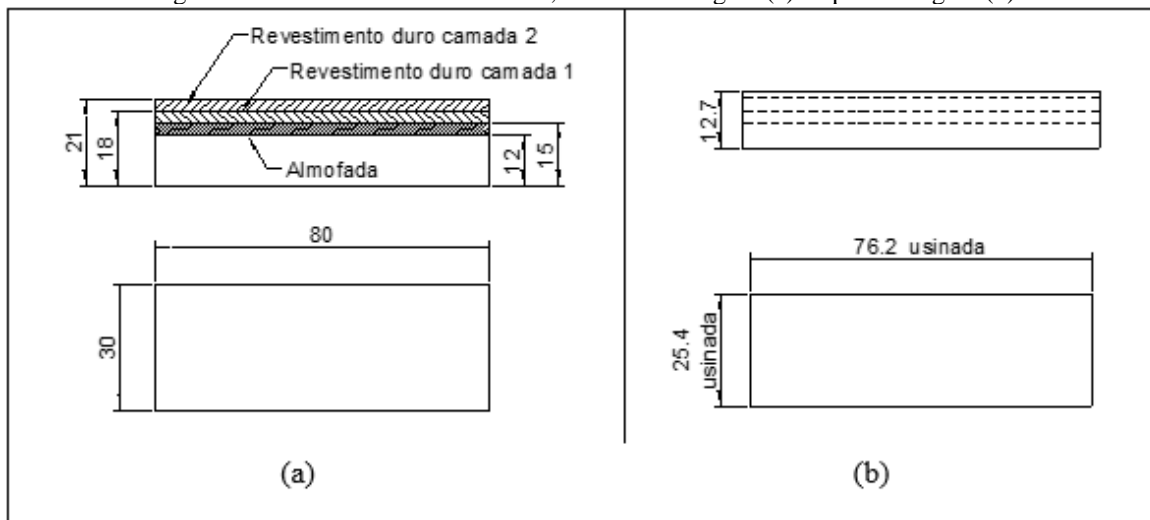
A soldagem foi realizada com cordões longitudinais, posição plana, de forma interca-lada. Cada CP recebeu um passe (camada) de almofada e dois passes de revestimento, con-trolando e mantendo a temperatura de interpasse abaixo de 230°C, com auxílio de um ter-mômetro infravermelho modelo raynger ST da Raytec, com range de -32°C a 400°C. A de-posição foi realizada através de um retificador de tensão, ESAB, Smashweld 408 topflex. A deposição da almofada foi realizada utilizando gás de proteção Arcal 12 (2%CO₂+Ar) e para deposição dos revestimentos gás de proteção Atal (25%CO₂+Ar). Os resultados dos parâmetros de soldagem adotados são apresentados na tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros de Soldagem FCAW.

CP	Liga do consumível	Diâmetro (mm)	Corrente Polaridade	Corrente (A)	Tensão (V)	Energia de soldagem (kJ/mm)
CP-A	FeCrC+Nb(1)	Ø1,6	CC+	204	24,4	1,9
CP-B	FeCrC+Ti	Ø1,6	CC+	256	25,3	2,8
CP-C	FeCrC+Nb(2)	Ø1,6	CC+	188	25,6	2,0
Almofada	FeCrMn+Ni	Ø1,6	CC+	232	21,2	1,9

Após a aplicação do revestimento, as faces dos corpos de prova foram usinadas, sen-do a superfície do revestimento retificada para avaliação de desgaste através do ensaio da roda de borracha (Figura 1).

Figura 1: Dimensões do CP revestido, antes da usinagem (a) e após usinagem (b)



Os testes de desgaste abrasivo foram realizados seguindo os requisitos da norma ASTM G65-16, no laboratório de desgaste de superfície (LDS) da Faculdade Satc. Após a preparação, os corpos de prova foram submetidos a limpeza por ultrassom e pesagem, antes e após ensaio de desgaste. Os parâmetros de aplicação adotados para ensaio de desgaste são apresentados na tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros Ensaio Roda de Borracha

Parâmetro	Valor Nominal
Rotação da roda de borracha	200 rpm
Vazão da areia	352g/min
Tempo de ensaio	30 min
Granulometria da areia	246,67 ± 66,71 µm
Carga aplicada no ensaio	130N
Abrasão linear	4309m

Os cálculos da taxa de desgaste foram realizados com a aplicação da Equação 1, ob-tendo-se os valores de perda do volume, considerando o peso específico dos revestimentos informado por seus fornecedores de 7,85g/cm³.

Equação 1: Taxa volumétrica de desgaste abrasivo

$$Q = \frac{\left[\left(\frac{M_i - M_f}{P} \right) \times 1000 \right]}{4309}$$

Onde:

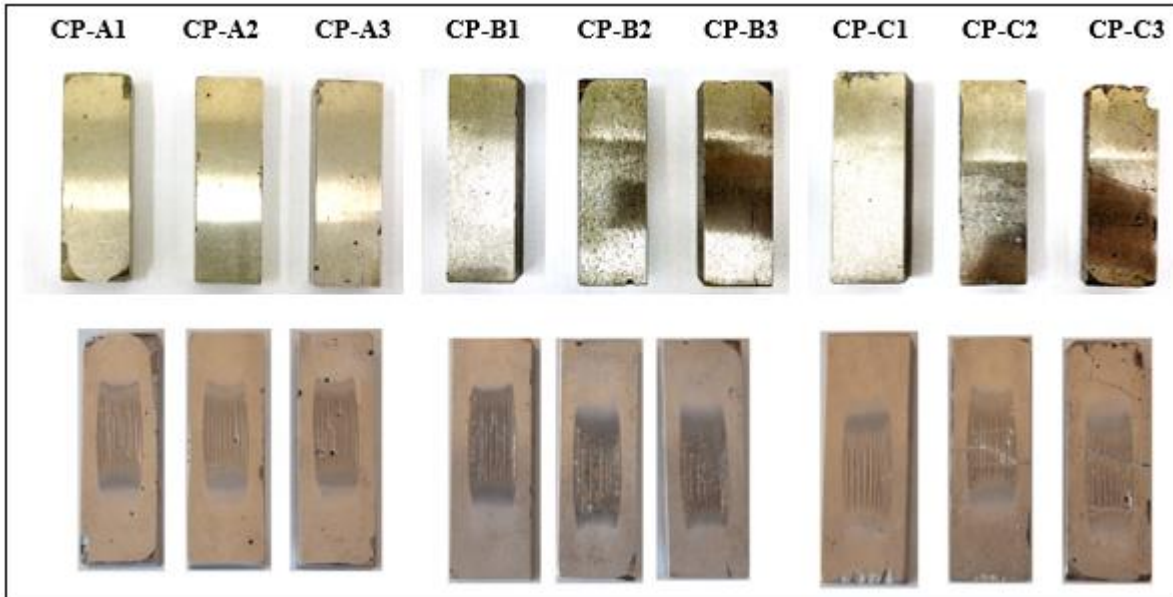
Q (mm³/m) é a taxa volumétrica de desgaste abrasivo

M_i (g) é a massa inicial da amostra

M_f (g) é a massa final da amostra

ρ (g/cm³) é a densidade do revestimento duro

Figura 2: Imagens superiores exibem os corpos de prova retificados para ensaio de desgaste. Imagens inferiores exibem os corpos de após o ensaio de desgaste



Para a análise microestrutural e de microdureza, os corpos de prova foram seccionados transversalmente, cortando a cicatriz de desgaste, através do processo de eletro erosão a fio. As amostras foram preparadas, lixadas e polidas conforme norma NBR 13284, preparação de corpos-de-prova para análise metalográfica. As peças foram atacadas com Nital 2% em ataque eletrolítico por 10s. A metalografia foi realizada em um microscópio Olympus BX51M equipado com câmera digital Olympus SC30, com ampliação máxima de 1000x.

A análise de microdureza foi realizada utilizando-se o Microdurômetro Shimadzu, com carga de 1,961N, aplicada com duração de 8s, para obtenção dos valores de dureza Vickers (HV).

A análise de dureza superficial efetuada através de um durômetro de bancada analógico Pantec, modelo RBSM, escala Rockwell.

3 RESULTADOS

A análise da dureza superficial (figura 3) demonstrou que a estrutura martensítica do revestimento duro CP-C, apresenta maior dureza (HRC), quando comparado com os demais revestimentos ensaiados. Este resultado está relacionado com a matriz hipereutética, composta, além dos carbonetos de Nióbio (formatos semelhantes a geometrias quadradas e hexagonais) na forma primária e secundária, de uma grande quantidade de carbonetos M_7C_3 .

Figura 3: Resultado ensaio dureza superficial Rockel C

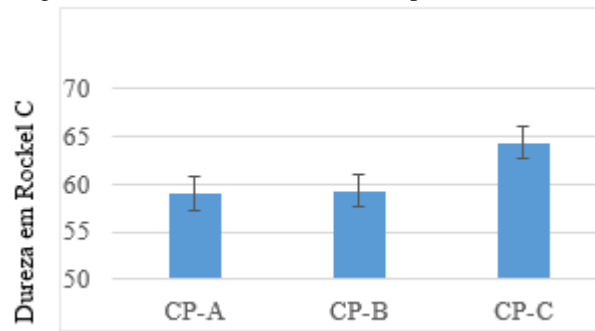
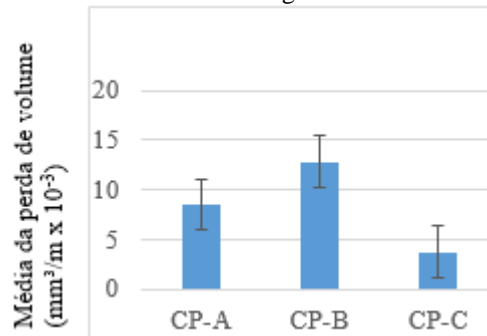


Figura 4: Resultado ensaio de desgaste abrasivo ASTM G65



Conforme Sinatora [13], os carbonetos de cromo do tipo M_7C_3 possuem dureza entre 1400 a 2000 HV. Maratray [14] observou que a elevada dureza do carboneto M_7C_3 pode contribuir para o aumento da resistência à abrasão, destacando também a importância de uma matriz resistente, de forma a ancorar os carbonetos e evitar sua quebra, deformação ou divisão. Definiu também sua quantificação através da equação:

Equação 2: Quantificação do percentual de carbonetos com base nos teores de cromo e carbono da liga

$$\%Carbonetos = 12,33 \times C + 0,55Cr - 15,2 \pm 2,1\%$$

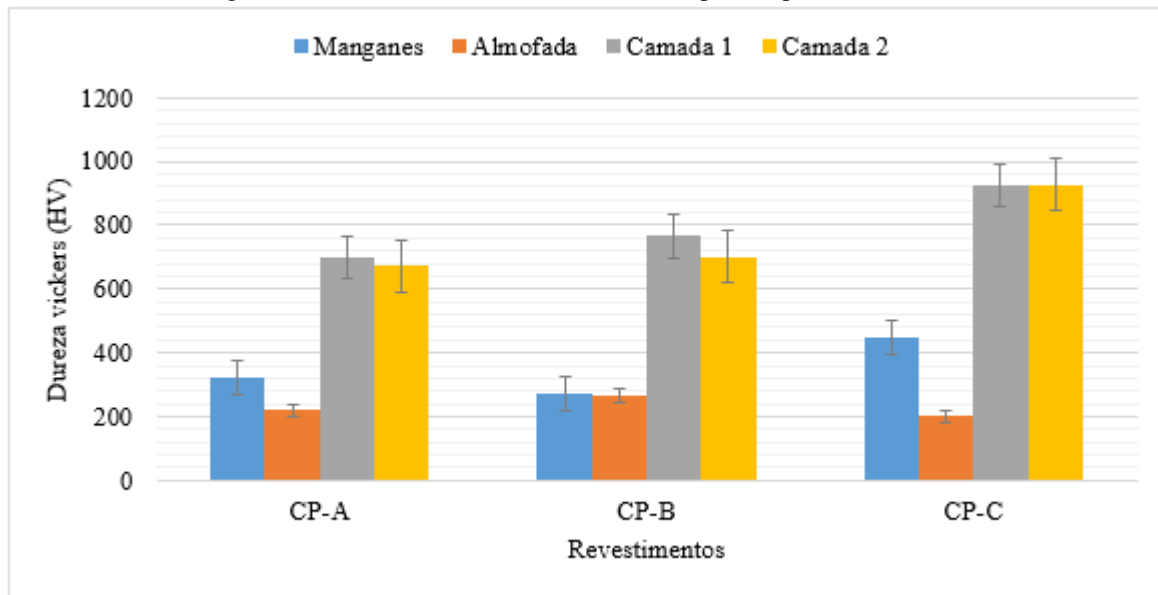
Com base nessa equação, a amostra CP-A contém 52,38% de carbonetos M_7C_3 e a amostra CP-C 64,72%, evidenciando sua elevada dureza, comparando com os demais re-vestimentos.

O resultado dos ensaios de desgaste conforme ASTM G65 são exibidos através da figura 4 e demonstram que o corpo de prova CP-C sofreu uma menor taxa de desgaste, seguido pelo CP-A e CP-B. O resultado aponta a direta relação da quantidade de carbonetos apresentados através da equação 2, com a menor taxa de desgaste abrasivo de baixa tensão. Entretanto, vale observar que a alta dureza e

baixa tenacidade poderá resultar em trincas e lascamentos quando este revestimento for submetido a outros mecanismos de desgaste.

Outro fator observado através dos resultados de ensaio de microdureza a partir da figura 5 é a queda de dureza na segunda camada nas amostras A e B. A amostra C não apresentou a mesma variação, apontando novamente para composição de sua matriz martensítica, passível do revenimento gerado através do aquecimento provocado pela segunda camada.

Figura 5: Resultado do ensaio de microdureza por Corpo de Prova (HV)



A figura 3(a), apresenta a metalografia obtida do revestimento CP-A, com estrutura dentrítica, e carbonetos primários de cromo (M_7C_3) e nióbio (NbC) em matriz eutética. A figura 3(b), apresenta a metalografia do revestimento a base de titânio, com distribuição uniforme de carbonetos de titânio (TiC), e ausência de carbonetos M_7C_3 , associado ao baixo teor de cromo na liga (aproximadamente 5,5%). Apresenta também uma matriz austenítica-martensítica, identificada, respectivamente, através das regiões claras e escuras da imagem. Já a metalografia do revestimento CP-C, figura 3(c), exibe uma matriz hipereutética, com alta densidade de carbonetos M_7C_3 em geometrias alongadas e carbonetos NbC .

As amostras A e C, embora com composição química muito próximas, possuem características e respostas distintas sobre os ensaios efetuados. A amostra A apresenta grãos mais refinados, com crescimento eutético, com aparente processo de solidificação dentrítica, indicando o crescimento cooperativo entre a austenita e os carbonetos. Enquanto a amostra C, apresenta grãos mais grosseiros, em crescimento hipereutético com formação martensítica. Os carbonetos de cromo do tipo M_7C_3 são

os primeiros a se precipitarem durante o processo de solidificação na poça de fusão, formando dessa forma, cristais de forma alongada. As metalografias com ampliação de 200x exibem as diferenças cristalográficas das amostras.

Figura 6: Metalografia dos CPs com ampliação de 1000x e indicação da microestrutura: (a) CP-A Fe-CrC+Nb(1), (b) CP-B FeCrC+Ti, (c) CP-C FeCrC+Nb(2).

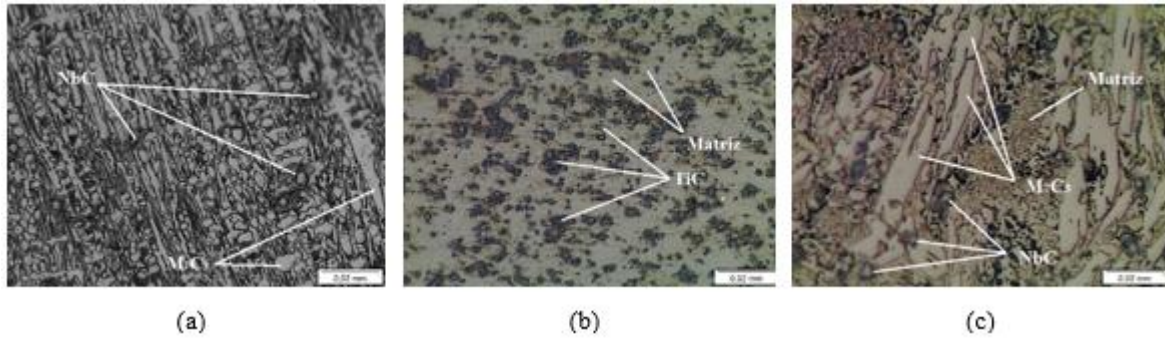
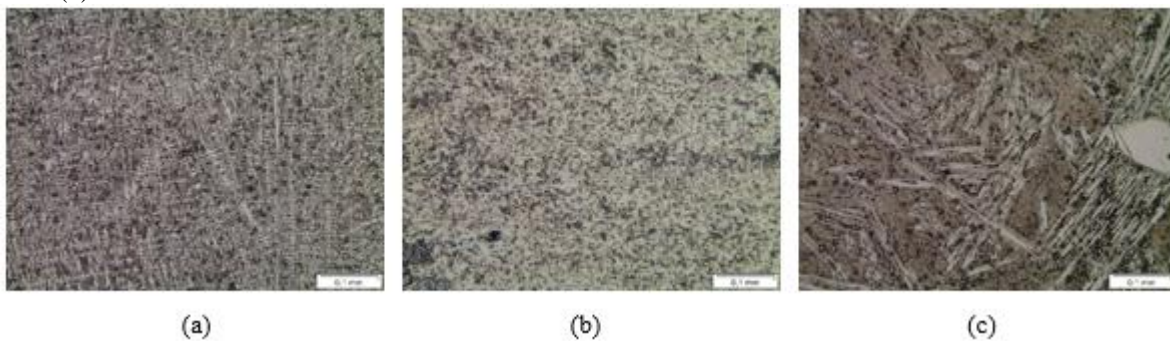


Figura 7: Metalografia dos CPs com ampliação de 200x: (a) CP-A FeCrC+Nb(1), (b) CP-B FeCrC+Ti, (c) CP-C FeCrC+Nb(2).



Os revestimentos A e B apresentaram dureza e microdureza similares, porém taxas de desgaste distintas, com o revestimento A apresentando uma taxa de desgaste 33,6% menor que o revestimento B.

Na condição dos ensaios aplicados, para solicitações de alta abrasão com baixa tensão, a amostra C obteve o melhor resultado dentre as três amostras, desempenho associado a microestrutura martensítica composta por carbonetos e depósitos de elevada dureza. Em contrapartida, a presença de trincas ligadas ao processo de alívio de tensão (Figura 2, amostras CP-C2 e CP-C3) durante a solidificação do depósito, demonstram uma possível fragilidade para aplicações associadas a desgaste e impacto.

4 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos é possível concluir que:

- Em geral, quando a avaliação de desgaste por abrasão é requerida, a dureza do de-pósito pode não refletir em superior resistência a abrasão. A microestrutura gerada na aplicação do revestimento também é fator determinante para obtenção de revestimentos com alta resistência ao desgaste.

Diferentes mecanismos de desgaste exigem diferentes abordagens para uma correta análise de sua resistência. Materiais extremamente duros podem responder de forma superior em solicitações de abrasão de baixa tensão e podem ser totalmente ineficazes, por sua grande fragilidade, em aplicações associadas ao impacto. Deve-se sempre considerar os mecanismos de desgaste e a análise tribológica do sistema para definir a melhor solução em revestimento.

- Com a aplicação de ligas compatíveis metalurgicamente é possível aliar os benefícios do revestimento duro sobre o aço manganês hadfield, considerando o controle térmico na aplicação, a utilização preferencial de revestimentos livres de trincas e os mecanismos de desgaste envolvidos.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Müller e P. Hrabě, “Overlay materials used for increasing lifetime of machine parts working under conditions of intensive abrasion”, *Res. Agric. Eng.*, vol. 59, no 1, p. 16–22, 2013.
- [2] B. Venkatesh, K. Sriker, e V. S. V. Prabhakar, “Wear Characteristics of Hardfacing Alloys: State-of-the-art”, *Procedia Mater. Sci.*, vol. 10, no Cnt 2014, p. 527–532, 2015.
- [3] Almendra; Carlos Antonio; et al., *SOLDAGEM*. São Paulo: SENAI São Paulo, 2013.
- [4] D. D. B. G. de Souza e V. A. Ferraresi, “Aplicação de revestimento duro utilizando o processo FCAW duplo arame para diferentes tipos de consumíveis utilizados na indústria sucroalcooleira”, *Rev. Mater.*, vol. 22, no 1, 2017.
- [5] B. Macedo e J. Gallego, “Efeito da morfologia dos carbonetos e da variação da microdureza em revestimentos duros resistentes ao desgaste abrasivo com aplicação na indústria sucroalcooleira”, *Dem.Feis.Unesp.Br*, 2009.
- [6] J. O. Agunsoye, T. S. Isaac, e A. A. Abiona, “On the Comparison of Microstructure Characteristics and Mechanical Properties of High Chromium White Iron with the Hadfield Austenitic Manganese Steel”, vol. 2013, no January, p. 24–28, 2013.
- [7] ASTM, “Standard Specification for Sand”, *Astm C778-13*, vol. 14, no April, p. 1–3, 2013.
- [8] P. F. Mendez et al., “Welding processes for wear resistant overlays”, *J. Manuf. Process.*, vol. 16, no 1, p. 4–25, jan. 2014.
- [9] ASTM A128/A128M – 93 (2017), “Standard Specification for Steel Castings, Austenitic Manganese”, ASTM, vol. A128/A128M, 2017.
- [10] P. E. David Havel, “Austenitic Manganese Austenitic Manganese”, *Columbia Steel Cast. Co., Inc.*, p. 1–19, 2017.
- [11] H. S. Avery e H. J. Chapin, “Austenitic manganese steel welding electrodes”, *Weld. J.*, vol. 33, no 5, p. 459–479, 1954.
- [12] K. Yang, Y. Gao, K. Yang, Y. Bao, e Y. Jiang, “Microstructure and wear resistance of Fe-Cr13-C-Nb hardfacing alloy with Ti addition”, *Wear*, vol. 376–377, p. 1091–1096, abr. 2017.
- [13] A. Sinatora, E. Albertin, e Y. Matsubara, “An investigation of the transition from M7C3 to M3C carbides in white cast irons”, *Int. J. Cast Met. Res.*, vol. 9, no 1, p. 9–15, 1996.
- [14] F. Maratray e R. Usseglio-Nanot, “Factors affecting the structure of chromium and chromium-molybdenum white irons.”, 1970.