

ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO E IMPACTO, EM SUPERFÍCIES REVESTIDAS POR SOLDAGEM APLICADAS NA MOAGEM SAG

G.M de Oliveira⁽¹⁾, S. S. Oliveira⁽²⁾, M. C. de Carvalho⁽¹⁾, E. M. Braga⁽³⁾.

⁽¹⁾ Instituto de Geociência e Engenharia – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA), Folha 17, Quadra 04, Lote Especial, Nova Marabá, CEP:68.505.080 , e-mail: glacieneoliveiraufpa@gmail.com

⁽²⁾ Gerência do Cobre-Vale S.A, Canaã dos Carajás, PA, Brasil.

⁽³⁾ Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Pará-Belém-PA

RESUMO

As operações de britagem e moagem estão sujeitas a um alto grau de desgaste por abrasão, erosão e impacto. Técnicas de caracterização microestrutural e de superfície aplicadas aos revestimentos resistentes ao desgaste, são importantes ferramentas para aumentar a produtividade e a qualidade destes materiais. Neste trabalho foram comparados os revestimentos depositados por soldagem (RDS) nas razões de arame frio (rAF) de 60%, 70%, 80% e 90% com o revestimento fundido (RF) utilizado no moinho SAG (Semi-autógeno) da mina de Sossego do município de Canaã dos Carajás. Foram utilizadas técnicas de caracterização de materiais e de propriedades mecânicas. A taxa de perda de massa em relação a rAF, comportou-se de forma inversa em relação a microdureza, ou seja, quanto maior a microdureza menor a perda de massa, contudo, os RDS 60%, 70% e 80% obtiveram maior perda em comparação com o RF que só foi menor que a perda de massa do RDS 90%.

Palavras chave: Revestimento, Arame frio, Processos de Soldagem, Desgaste por Impacto, Abrasão

INTRODUÇÃO

Revestimentos depositados por soldagem tem sido largamente empregados em diversas áreas da indústria da mineração. A técnica de aplicação de revestimentos duros, também conhecida como revestimentos soldados, refere-se a uma família de processos que depositam por soldagem uma camada protetora a uma superfície a ser protegida ⁽¹⁾. Geralmente a aplicação de revestimentos

soldados gera uma superfície fundida formando uma interface onde ocorrem fenômenos físicos químicos e metalúrgicos. Neste trabalho foram investigados a microestrutura e as propriedades mecânicas de revestimentos ferríticos de segunda fase (Rfe-SF), resistentes ao desgaste obtidos pelo processo GMAW-CW.

Revestimentos duros são aplicados principalmente com o objetivo de reduzir o desgaste através do aumento da resistência da superfície do metal a abrasão, impacto, erosão ⁽²⁾.

As ligas metálicas resultantes de revestimentos resistentes ao desgaste pertencem a dois grupos principais de materiais, o grupo dos carbeto de cromo e carbeto de tungstênio, entretanto, ambos apresentam restrições de custo e operacional. Carbeto de tungstênio, que formam praticamente materiais metálicos de matriz compósita, sendo estes um dos materiais mais resistentes ao desgaste, porém apresentam problemas de dissolução e também são de custo elevado. Os revestimentos de carbeto de cromo apresentam um menor custo em relação aos revestimentos de carbeto de tungstênio, mas podem apresentar uma série de defeitos como segregação, porosidades e trincas ⁽³⁾.

A aplicação adequada destes materiais necessita do emprego de técnicas modernas de caracterização de materiais e de propriedades mecânicas. Procedimentos avançados de caracterização estrutural, microscopia eletrônica de varredura.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os RFe-SF analisados neste estudo foram depositados em placas de aço baixo carbono (9,5 mm x 63,5 mm x 101,6 mm), pelo processo GMAW-CW utilizando um arame eletrodo tubular (Castolin-Eutectic DO*12) de 1,2 mm de diâmetro e um segundo arame de adição não energizado de baixo carbono (ESAB OK Autorod 13.6-ER70S6) (Fig. 3). Aplica-se um cordão soldado de uma única camada usando-se uma técnica de tecimento com 25 mm de amplitude de oscilação, 5,5 s de período oscilação e 30 % de sobreposição em cada passe. Os parâmetros da soldagem GMAW-CW são mostrados na Tab. 1. A temperatura de interpasse é menor que 100°C e após a soldagem a placa foi resfriada ao ar, e não houve tratamento térmico posterior. A razão de arame frio (rAF), é definida na Eq. A, como a razão entre a velocidade de alimentação do arame frio (vAF) e a velocidade de

alimentação, ao do arame energizado (vAE). A razão de arame frio foi mantida em quatro níveis: 60 %, 70 %, 80% e 90 %, e três réplicas foram fabricadas para cada rAF.

Tabela 1. – Parâmetros da soldagem GMAW-CW para o RFe-SF

Parâmetros de Soldagem	Valores
Distância do bico de contato a peça	25 mm
Velocidade de soldagem	100 mm/min
Velocidade de alimentação do arame	9 m/min
Voltagem	29 V
Corrente	250 A
Vazão da mistura 75%Ar25%CO ₂	15 l/min

$$r_{AF} = \frac{v_{AF}}{v_{AE}} \quad (A)$$



Figura 3– Bancada preparada para execução da soldagem GMAW-CW

A amostra para caracterização (10 mm x 63,5 mm x 14,7 mm) foi extraída de uma placa (106 mm x 63,5 mm x 14,7 mm) através de um corte perpendicular a direção de soldagem (Fig. 4). O material foi lixado e polido com pasta de diamante, seguindo procedimentos de preparação, de amostra padronizados para observação metalúrgica. As imagens de microscopia óptica foram realizadas, utilizando-se um microscópio óptico (MO) de luz refletida de platina normal Cannon. As análises químicas quantitativas foram realizadas em um espectrômetro de emissão óptica (optical emission spectrometer OES) Oxford Foundry Master. Os ensaios de microdureza foram realizados em um microdurômetro da marca Mitutoyo da série HM100.

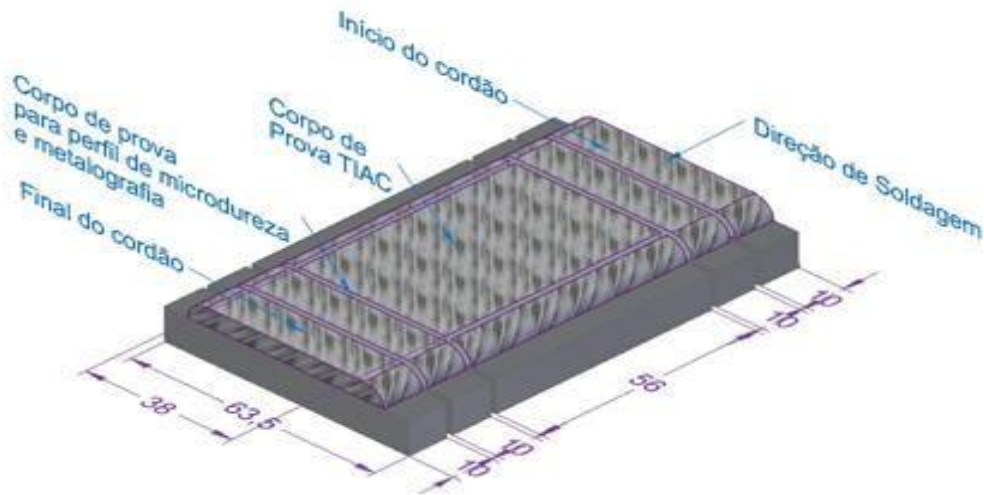


Figura 3– Esquema mostrando a placa de RFe-SF e o local de retirada das amostras (dimensões em mm)

Procedimento experimental executado na caracterização do desgaste pelo teste de impacto abrasão compacto (tiac)

O teste de impacto abrasão compacto foi realizado em uma máquina customizada da marca ASTECMA. O corpo de prova (56 mm x 38,5 mm x 14,7 mm e área superficial de 2128 mm^2) para teste de impacto abrasão compacto (TIAC) foi extraído da placa mostrada na Fig.3. Os três CP's são fixados em um suporte cada (Fig. 4) ao rotor central da máquina. O rotor central gira no sentido anti-horário com uma velocidade de 600 rpm, enquanto que um tambor que tem a função de elevar o material desgastante, também gira no sentido anti-horário, a velocidade de 55 rpm (Fig. 5). O material desgastante utilizado foi o minério de cobre proveniente do moinho SAG instalado na mina do Sossego em Canaã dos Carajás-PA. O minério foi classificado como passante na peneira de malha equivalente a 12,5 mm e retido na peneira de malha equivalente a 9,5 mm. O peneiramento permite não só a classificação, mas também a homogeneização do elemento desgastante fazendo com que o comportamento em relação ao desgaste seja atribuído principalmente ao material testado. O ensaio TIAC foi realizado em cinco bateladas, utilizando-se 600 g de minério a uma razão massa/área superficial desgastada do CP de 0,28 g/mm^2 e três CP's por batelada de 15 minutos, com o objetivo de determinar a taxa de perda de massa em g/min dos revestimentos obtidos por SAW e GMAW-CW.

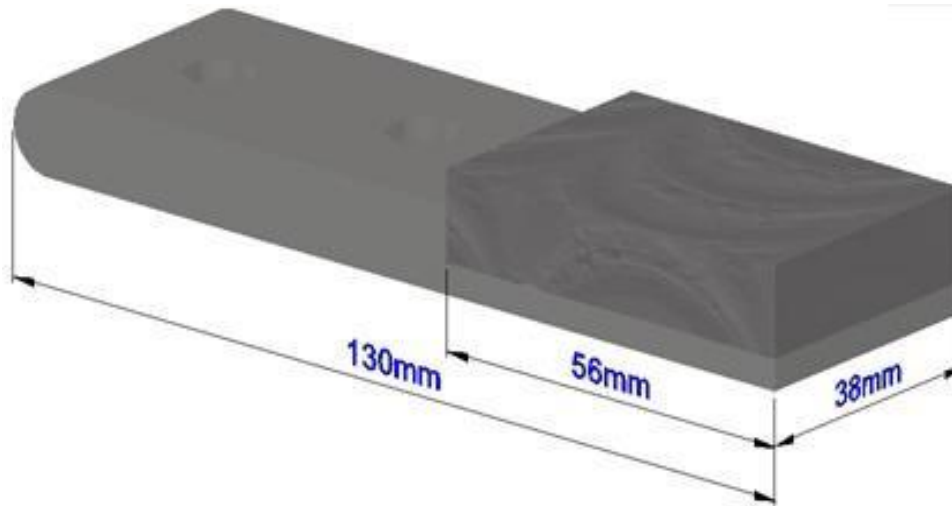


Figura 4. – Esquema mostrando o CP fixado ao suporte que será montado juntamente com mais dois suportes no rotor central do TIAC.

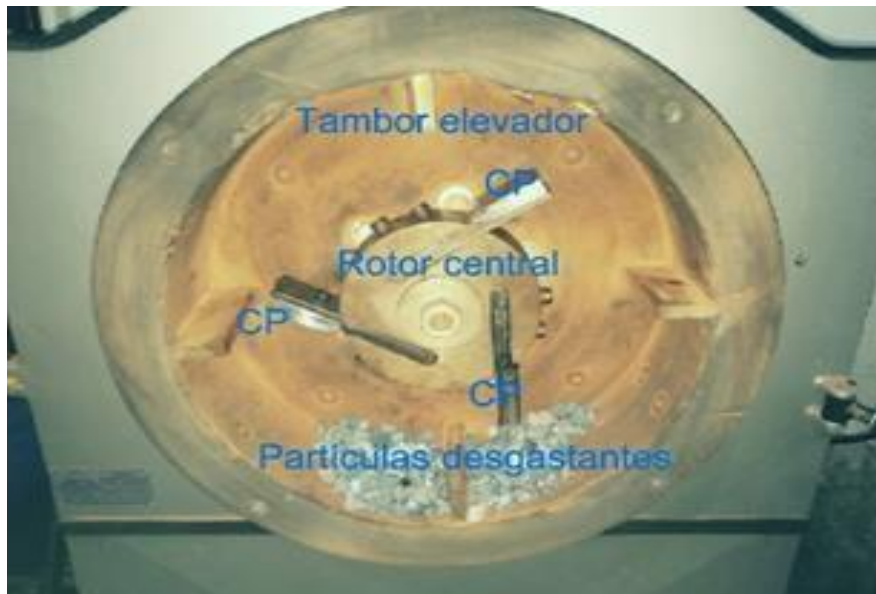


Figura 5 – TIAC carregado para execução do ensaio de desgaste dos RFe-SF.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O RFe-SF também apresentou uma superfície relativamente lisa, apesar de ocorrerem, porosidades e canaletas ao longo da sobreposição entre os cordões de solda.

A análise da composição química do RFe-SF (topo da superfície) e do metal de base (base da superfície), foi realizada por espectroscopia de emissão óptica (EO), e são mostradas na Tabela. 2. A quantidade de carbono e cromo encontradas no topo da superfície do RFe-SF são características de um aço de baixa liga, como

mostra a tabela 2, os teores de carbono e cromo tiveram uma tendência a aumentar com o aumento de r_{AF} . O carbono é um elemento que em pequenas variações de concentração pode alterar completamente a microestrutura de um aço, podendo estas pequenas variações modificar inteiramente a microestrutura resultante, dependendo da história térmica do material. O teor de manganês apresentou uma pequena variação no r_{AF} 60 %, mas de uma maneira geral permaneceu constante. O manganês é normalmente empregado na fabricação dos aços como desoxidante. Em concentrações mais altas o manganês eleva a resistência ao desgaste do aço, porem reduzindo sua tenacidade. O molibdênio também apresentou uma tendência de crescimento com o aumento do r_{AF} . O molibdênio é um elemento que em pequenas concentrações promove a formação de carbeto.

Tabela 2– Composição química do RFe-SF com r_{AF} igual a 60 %, 70 %, 80 %, e 90 % (superfície de topo).

r_{AF}	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
60%	94,9	0,260	0,494	0,666	0,0113	0,001	2,61	0,646	0.0578
70%	94,5	0,264	0,662	0,739	0,0112	0,0031	2,81	0,642	0.0693
80%	94,4	0,290	0,517	0,664	0,0110	0,005	3,10	0,714	0.0444
90%	94,4	0,305	0,567	0,661	0,007	0,005	3,14	0,680	0.045

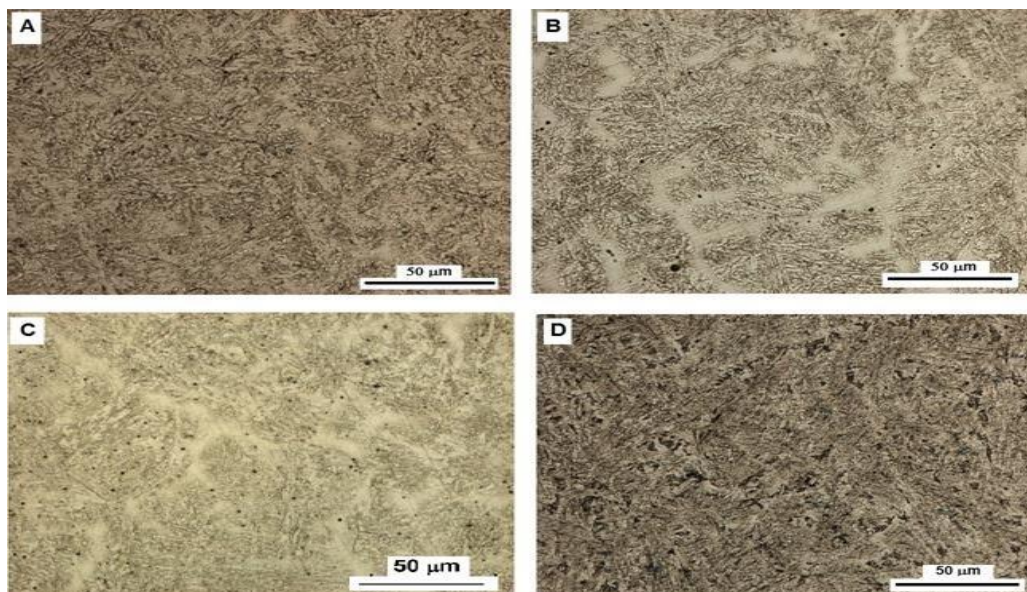


Figura 6 – Microestrutura ferrítica com precipitados de segunda fase da superfície de topo do RFe-SF com diferentes r_{AF} . A) 60 %, B) 70 %, C) 80 % e D) 90 %.

A microestrutura do RFe-SF foi revelada com o ataque de nital 2 %. A Figura 6 apresenta a microestrutura de topo do RFe-SF onde foi identificada a microestrutura ferrítica com segunda fase. A segunda fase pode ser, bainita, martensita e carbeto de cromo. A projeção liquidus mostrada na Fig. 7 sugere que a ferrita CCC solidifica primeiro e o líquido restante se decompõe em uma reação eutética em austenita e carbeto secundário (M_7C_3), entretanto, conforme comentado anteriormente, estes diagramas são para condições de equilíbrio. A solidificação devido as altas taxas de resfriamento, inerentes ao processo de soldagem, favorecem a ocorrência de transformações displacivas, levando a formação de martensita e bainita.

Os ensaios de microdureza foram realizados no topo da superfície, em uma linha transversal a direção de soldagem, e ao longo da seção transversal dos revestimentos. Os resultados das microdurezas para cada rAF na superfície de topo, são mostrados nas Figuras (8.a-8.d). A microdureza apresentou uma tendência de aumento a medida que aumenta a rAF, este aumento pode ser atribuído a uma tendência de aumento nas concentrações de carbono e cromo a medida que cresce a rAF, favorecendo a formação da segunda fase mais dura, comportamento semelhante pode ser observado nas microdurezas da seção transversal do RFe-SF(perfil de microdureza), ver Figuras. 8.d-8.h. As variações de microdureza observadas são devido à natureza polifásica do material, alternando ferrita, uma fase relativamente mais "mole" e a segunda fase mais "dura", bainita, martensita e carbeto de cromo.

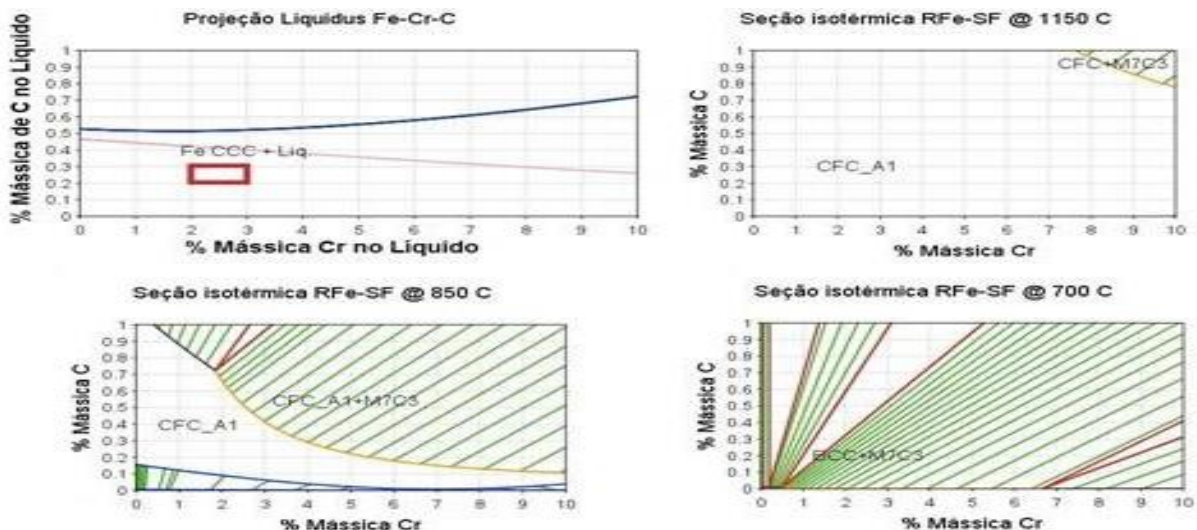
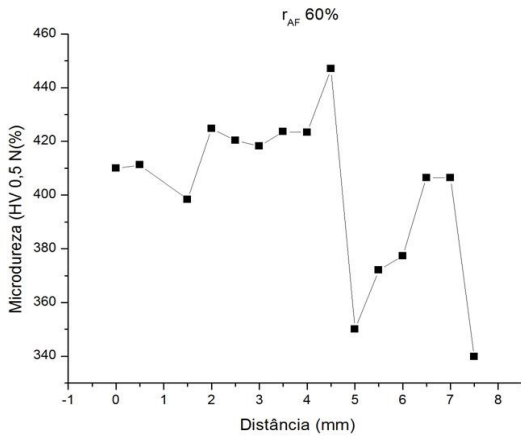
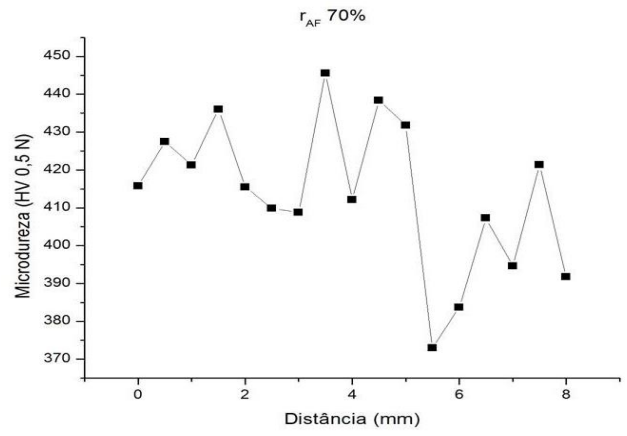


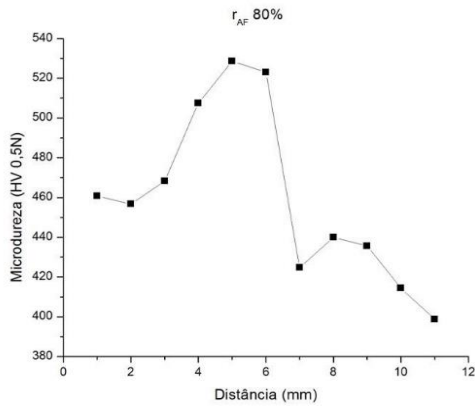
Figura 7– Projeção liquidus e isotermas do sistema FeCrC calculados pelo programa Thermocalc. A posição do RFe-SF nos diagramas é indicada pelo retângulo vermelho.



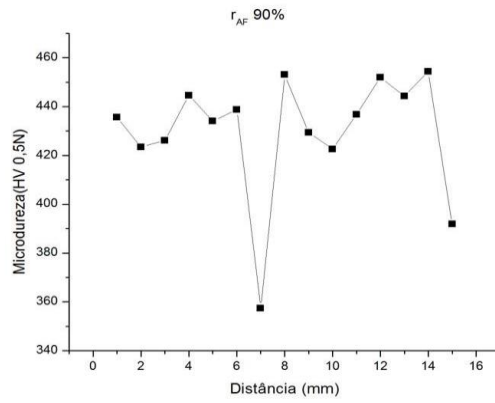
a)



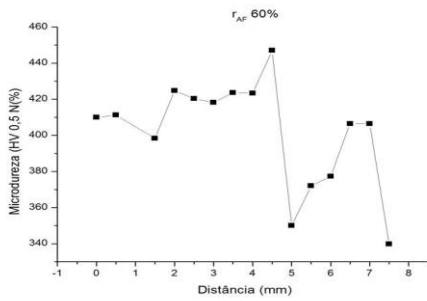
b)



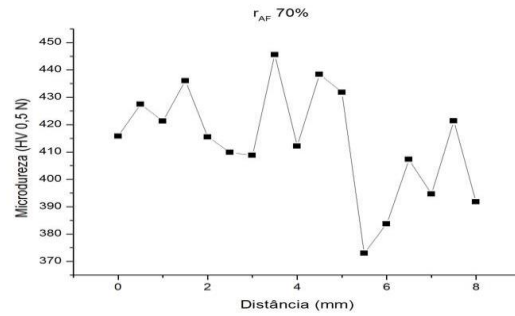
c)



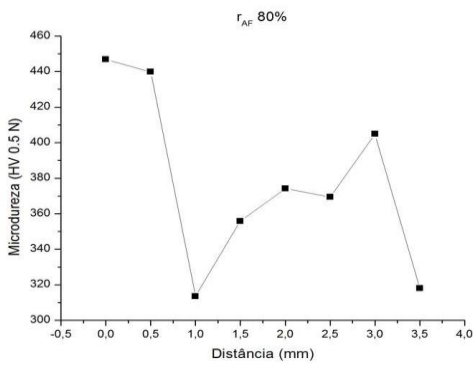
d)



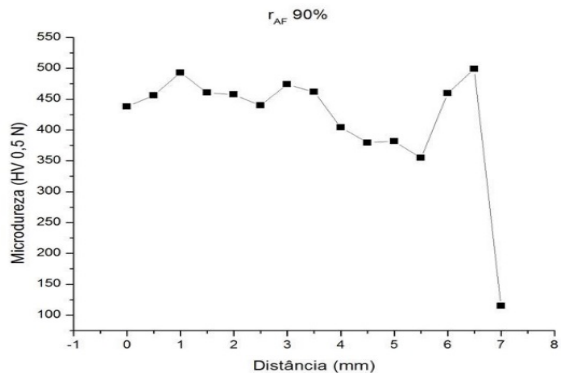
e)



f)



g)



h)

Figura 8– Microdurezas da superfície de topo para razão de arame frio e Perfil de microdureza na seção transversal. do RFe-SF para a razão de arame frio (r_{AF}) a) razão de arame frio (r_{AF})=60%. b) para razão de arame frio (r_{AF})=70%.c) razão de arame frio (r_{AF})=80%.d) razão de arame frio (r_{AF})=90%. e) microdureza na seção transversal do RFe-SF para a razão de arame frio (r_{AF}) de 60 %. f) microdureza na seção transversal do RFe-SF para a razão de arame frio (r_{AF}) de 70 %. g) microdureza na seção transversal do RFe-SF para a razão de arame frio (r_{AF}) de 80 %. h) microdureza na seção transversal do RFe-SF para a razão de arame frio (r_{AF}) de 90 %.

Apresentação e discussão dos resultados da caracterização do desgaste pelo teste de impacto abrasão compacto (tiac)

O teste de impacto abrasão compacto foi realizado com a utilização de minérios provenientes da mina do Sossêgo da região de Carajás, segundo Shimizu⁽⁴⁾, os minérios da mina do Sossêgo são compostos principalmente de óxidos de ferro (magnetita e hematita), actinolita, feldspato (albita e feldspato potássico), mica (biotita e muscovita) e clorita. O minério foi cominuído no moinho SAG e as partículas classificadas segundo a granulometria requerida pelo ensaio apresentaram formas poligonais, com ângulos de aresta variando de 65 a 113 graus (Fig. 10), e uma microdureza média de $679,9 \pm 32,1$ HV.

As curvas de perda de massa cumulativa versus tempo (média de três ensaios) para o RCC e os RFe-SF's de 60 %, 70 %, 80 % e 90%, são apresentadas na Figura 11. A taxa de desgaste por impacto e abrasão combinados pode ser determinada, calculando-se a inclinação da curva de perda de massa cumulativa versus tempo ⁽⁵⁾. As taxas de desgaste para o RCC e RFe-SF's são apresentadas na Tabela 3. Os RFe-SF's e RCC apresentaram um crescimento da perda de massa ao longo do tempo de ensaio e o RCC apresentou a menor taxa de perda massa, 48,1 % menor que a do RFe-SF de 90 % e 61,4% menor que a do RFe-SF de 60 %, entretanto, em um dos ensaios nos primeiros quinze minutos de teste, um dos CP's apresentou uma elevada perda de massa que ocorreu devido a um lascamento, este lascamento ocorreu provavelmente devido à natureza frágil do RCC e também devido aos defeitos deste material. O lascamento do CP provocou a grande variação no desvio padrão dos primeiros quinze minutos de teste. A taxa de perda de massa aumentou

com a redução da razão de arame frio (Tab.3). A taxa de perda de massa do RFe-SF de 60 % é 34,6 % maior que a do RFe-SF de 90 %. A taxa de perda de massa em relação a r_{AF} , comportou-se de forma inversa em relação a microdureza, ou seja, quanto maior a microdureza menor a perda de massa. A combinação de impacto e abrasão neste caso com a predominância do impacto, segundo Kirchgabner⁽⁶⁾, muda completamente o comportamento do material em relação ao desgaste se comparado com o teste de abrasão simples da norma ASTM G65. A liga submetida a impacto e abrasão combinados, que combinar tenacidade com dureza provavelmente apresentará uma menor taxa de desgaste ao longo de sua vida útil.

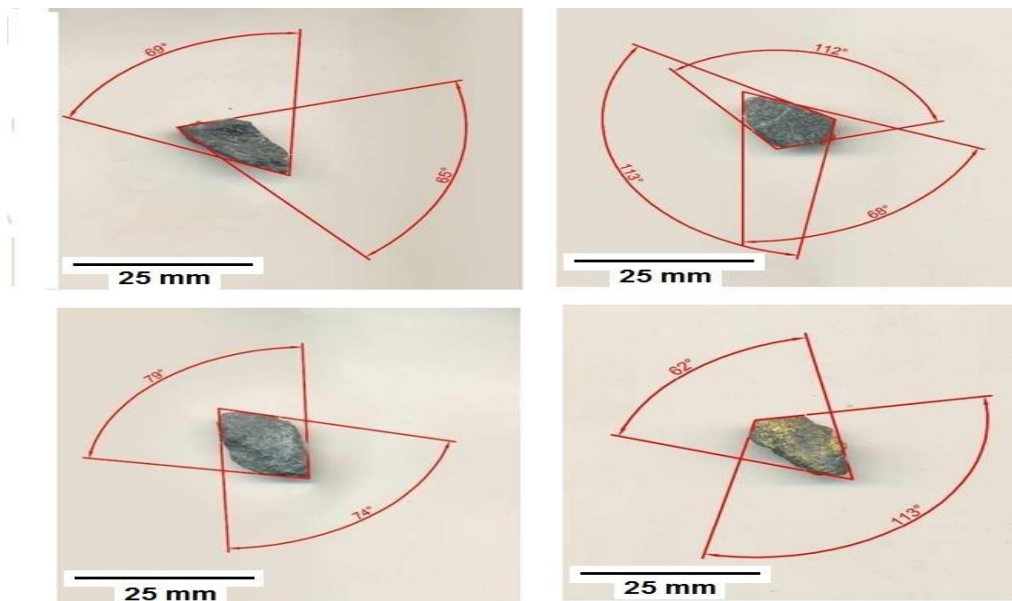


Figura 10 – Determinação dos ângulos das partículas de minério provenientes

Tabela 3– Taxas de desgaste para o RCC e RFe-SF's com razão de arame frio de 60%, 70%, 80% e 90%.

Revestimento	Taxa de desgaste
RFe-SF 60%	7,0 mg/min
RFe-SF 70%	6,8 mg/min
RFe-SF 80%	6,4 mg/min
RFe-SF 90%	5,2 mg/min
RCC	2,7 mg/min

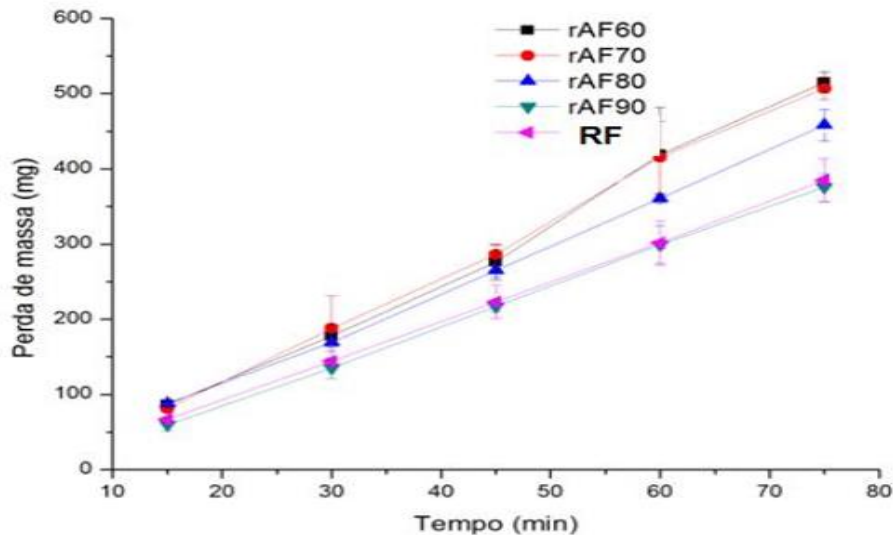


Figura 11– Gráfico da perda de massa versus tempo para o RF e DRS com razão de arame frio de 60%, 70%, 80 e 90%

CONCLUSÃO

De acordo com os resultados apresentados, os RFe-SF's e RCC apresentaram um crescimento da perda de massa ao longo do tempo de ensaio.

O RCC apresentou a menor taxa de perda massa, 48,1 % menor que a do RFe-SF de 90 % e 61,4% menor que a do RFe-SF de 60 %.

A taxa de perda de massa aumentou com a redução da razão de arame frio. A taxa de perda de massa do RFe-SF de 60 % é 34,6 % maior que a do RFe-SF de 90 %. A taxa de perda de massa em relação a r_{AF} , comportou-se de forma inversa em relação a microdureza, ou seja, quanto maior a microdureza menor a perda de massa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] TUCKER, R. C. Jr., **Surface Engineering, Thermal Spray Technology**. ASM Handbook, ASM International, vol. 5A, p. 10-30, 2013.

[2] O'BRIEN, A., **Welding Handbook, Materials and Applications**, Part 1 - 7. Surfacing Materials. American Welding Society (AWS) 9th Ed., vol. 4, P. 453-512, 2011.

[3]CARVALHO, M. C., **Analysis of Microstructure and Mechanical Properties of Overlays Welded by SAW and GMAW-CW**. 2016. 85 f. Thesis, Federal University of Pará, Belém.

[4]SHIMIZU, V. K., **Classificação e caracterização de tipos de minério de cobre da mina do Sossêgo** - Região de Carajás. Dissertação, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, pp. 121, 2012.

[5] WILSON, R. D., HAWK J. A., **Impeller wear impact-abrasive wear test**, *Wear*, vol. 225-229, p. 1248-1257, 1999.

[6] KIRCHBNER A. et al, **Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact**, *Wear*, Vol. 265, p. 772-779, 2008.

ANALYSIS OF RESISTANCE TO ABRASION AND IMPACT ON WELDED DEPOSITED OVERLAYS APPLIED IN GRINDING SAG

ABSTRACT

Crushing and grinding operations are subject to a high degree of abrasion wear, erosion and impact. Microstructural characterization and wear tests applied to wear resistant overlays are important tools for increasing productivity and quality of these materials. In this study one compared the overlays deposited by welding (RDS) in cold wire ratios of (RAF) 60%, 70%, 80% and 90% with the molten coating (RF) used in the SAG mill (semi-autogenous) Mine of Sossego Canaan dos Carajás municipality, Pará, Brazil. Techniques for material characterization and mechanical properties were used. The mass loss rate with respect to Raf behaved in the opposite way in relation to hardness, ie, the higher the mass loss, the higher the microhardness, however, the RDS 60%, 70% and 80% showed a lower mass loss compared with the RF wich was only lower than the RDS 90%.

Keywords: *Overlays , cold wire, welding processes, impact abrasion wear.*