



ANÁLISE DE DESGASTE ABRASIVO DO REVESTIMENTO DURO A BASE DE CARBONETOS DE CROMO DEPOSITADO POR SMAW

FERNANDO MICHELON MARQUES¹, RODRIGO CARDOSO COSTA¹, GUILHERME NASCIMENTO GALINDRO¹, ALEXANDRE SILVA ROCHA²

¹Faculdade SATC – Graduação em Manutenção Industrial

Laboratório de Desgaste de Superfície – LDS

Rua Pascoal Meller 73, Criciúma-SC, Brasil

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFRGS. Grupo de Engenharia de Superfícies – GES

Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre-RS, Brasil

(Recibido 27 de abril de 2015, revisado 26 de mayo de 2015, para publicación 31 de enero de 2016)

Resumo – As dificuldades encontradas na mina de carvão, muitas vezes não é a falta de recursos econômicos, mas sim da eficiência operacional que depende da manutenção das máquinas. A superfície das máquinas, que realizam atividades extrativas, está submetida ao desgaste abrasivo severo, que ocorre violentamente, respondendo-se com rápidos consertos para não parar a máquina. O concerto com solda é amplamente utilizado na mina, e consiste em reparo as superfícies desgastada. O reparo é realizado com a técnica de deposição por soldagem SMAW Processo (Shielded Metal Arc Welding), utilizando UTP-61 Ledurit eletrodo. O estudo experimental realiza-se em amostras com desgaste abrasivo de acordo com a norma ASTM G65. As chapas amostras são submetido ao deslizamento do material abrasivo de areia submetido a pressão através de uma roda de borracha giratória. Nos ensaios analisa-se o desempenho da solda de eletrodo revestido, com um e dois passes de disposição na superfície da amostra. Os materiais usados como substrato na deposição de soldadura são as chapas Hardox 450 e SAE 1020. Os ensaios mostram que com dois passagens de solda, uma subsequente à outra, a soldadura com revestimento de material Ledurit de UTP-61, teve um rendimento mais elevado.

Palavras-chave – Desgaste Abrasivo, SMAW Processo, Teste ASTM G65.

1. INTRODUÇÃO

A região sul do Brasil se destaca nacionalmente, por concentrar inúmeras empresas voltadas à extração de carvão mineral. Nesse extrativismo prevalece o sistema de lavra subterrânea, cujo produto extraído das minas é consumido, na maior parte, em termoelétricas dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, na geração de energia elétrica.

O atual cenário de desenvolvimento e aplicação da tecnologia do setor metal mecânico, permite a execução dos projetos de equipamentos industriais, de diversos segmentos e com elevada eficiência produtiva, tendo como característica principal os ciclos de operação com poucas paradas.

Essa mesma característica de eficiência operacional também é observada no seguimento da mineração. A mecanização de todo o processo de extração de carvão mineral, fez aumentar a produção desse tipo de minério, onde um equipamento conhecido como Minerador Contínuo, vem sendo aplicado com frequência nas minas de carvão.

A gestão de manutenção das mineradoras, que utilizam o Minerador Contínuo, identifica que o rápido e excessivo desgaste do chassi desse equipamento, têm contribuído para o aumento das paradas de manutenção e por consequência, a elevação dos custos de produção.

Segundo Ratia (2013), o desgaste dos materiais traz muitos problemas para a indústria, tais como a deterioração da resistência mecânica e alteração dimensional de componentes da máquina. Esses fatores elevam os custos adicionais, bem como o aumento da carga ambiental, quando os componentes precisam ser substituídos prematuramente.

Conforme Castro (2010), atualmente são empregadas algumas técnicas de deposição dos revestimentos superficiais de elevada dureza superficial, com a promessa de combater os mecanismos de desgaste atuan-

tes no sistema tribológico, onde essas peças mecânicas realizam suas funções, aumentando o tempo de operação dessas peças. Sendo assim, os revestimentos duros podem ser depositados pela técnica de soldagem ou metalização. Em alguns casos o bom desempenho do revestimento metálico depositado frente aos diferentes tipos de desgaste mecânico, eleva o tempo de operação das peças manufaturadas em relação às peças novas.

Segundo Bressan *et al.* (2001), o desgaste superficial de peças mecânicas, acontece em meio aos fenômenos físicos e químicos de entendimento complexo, no entanto os principais mecanismos de desgaste ocorrem a partir do contato físico de superfícies em movimento, ou do impacto de partículas duras contra superfície sólida.

Conforme Oliveira *et al.* (2011) as partes mecânicas de equipamentos dos sistemas de lavra de carvão mineral, também estão sobre a ação de agentes químicos, e são esses os responsáveis pela corrosão das superfícies expostas. O carvão mineral, na sua maioria, é composto principalmente de caulinita, ilita, átomos de carbono, oxigênio, nitrogênio mineral, em conjunto com 10 a 25% de quartzo e proporções menores de calcita, além de enxofre associados a outros elementos rochosos e minerais como a pirita. Sendo assim, esse tipo de minério apresenta acelerado desgaste superficial das peças mecânicas, por existir de forma associada o desgaste mecânico e químicos das peças envolvidas no sistema de extração.

O presente trabalho, tem por objetivo analisar o desgaste abrasivo severo, dos revestimentos duro a base de carboneto de cromo, os quais foram depositados pelo processo de soldagem por eletrodo revestido, com um e dois passes de disposição, em comparação com o desempenho do aço Hardox-450, cujo material é empregado no chassi do Minerador Contínuo da empresa Carbonífera Rio Deserto de Criciúma-SC.

1.1. Caracterização do Problema

Segundo Oliveira (2011), o Minerador Contínuo é um equipamento hidráulico, que escava a frente de mineração e direciona todo material escavado para a correia transportadora ou microtratores. O chassi do Minerador Contínuo é parte do equipamento que mais sofre desgaste, dentre das demais partes e peças do equipamento. O chassi desse equipamento é composto por duas partes principais: a primeira parte é a estrutura constituída em aço carbono SAE 1020, e segunda parte é a caixa de transporte constituída do aço HARDOX-450. Sendo assim, é a superfície da chapa da caixa de transporte, que de fato entra em contato com todo material escavado, apresenta o maior desgaste superficial. Por isso que o aço HARDOX-450, é empregado nesse caixa, pois esse material é um aço de alta resistência mecânica, e apresenta uma maior dureza superficial (HRc), em comparação com o aço carbono SAE 1020.

O desgaste dessa parte do Minerador Contínuo ocorre de forma pontual e intensa conforme visualização da Fig. 1. O severo desgaste superficial da chapa de sacrifício aumenta o custo de produção, devido ao aumento no número de paradas e o maior tempo de execução da manutenção corretiva.

A manutenção preventiva inspeciona o surgimento do desgaste pontual nas superfícies, assim como sua evolução. Quando a área afetada é considerada crítica, uma ordem de serviço é emitida para recuperá-la pelo processo de soldagem. Nesse tipo de manutenção corretiva, normalmente são aplicados alguns tipos de revestimentos duros nas áreas de interesse. Somente em casos de desgastes extremos, ou de paradas para reforma geral que toda a chapa do chassi é trocada.



Fig. 1. Ponto de desgaste aço Hardox-450.

De acordo com Macedo *et al.* (2008), o processo de soldagem de revestimento consiste em produzir na superfície, uma camada de material de elevada dureza superficial. Normalmente essa característica apresenta boa resistência aos mecanismos de desgaste, principalmente ao do tipo abrasivo. Os materiais empregados nas almas de eletrodo revestidos, arames maciços ou tubulares, os destinados à deposição de revestimentos duros, normalmente são constituídos de ligas metálicas, que durante o resfriamento da poça de fusão provocam a precipitação de carbonetos, os quais possuem características de elevada dureza, tendendo assim ao aumento da resistência contra o desgaste abrasivo.

1.2. Desgaste Abrasivo

Para Batista *et al.* (2004), o desgaste de componentes e equipamentos industriais, em qualquer ramo de atividade, representa um grande fator de depreciação de capital e de fonte de despesas com manutenção e reposição de componentes mecânicos. Muitas vezes exige: à equipe de engenharia, a elaboração de projetos superdimensionados; do setor de produção, a operação do equipamento com parâmetros limitados; e do setor da manutenção, a interrupção da produção para correção de um problema. Estes fatores influem significativamente sobre as perdas indiretas do rendimento de produção. Como o desgaste é um fenômeno essencialmente superficial, envolvendo a remoção mecânica indesejável de material de superfícies, as soluções encontradas através de solda de revestimento têm-se mostrado altamente valiosas, tanto para prevenir, quanto para minimizar a progressão do mecanismo de desgaste.

Segundo Pascoali (2004), o desgaste abrasivo pode ocorrer em sistema tribológicos, onde a remoção do material da superfície metálica, é causada pelo contato físico de partículas duras contra a superfície sólida. As partículas duras, podem estar aprisionadas na interface entre duas superfícies em movimento relativo, ou nas protuberâncias que fazem parte da rugosidade das superfícies. O desgaste abrasivo pode ser classificado de dois ou três corpos: na abrasão de dois corpos, as partículas abrasivas são movidas livremente sobre a superfície do material; no desgaste abrasivo de três corpos, as partículas abrasivas agem como elementos de interface entre o corpo sólido e o contracorpo. O desgaste quando envolve três corpos normalmente apresenta taxa na ordem de duas a três vezes menor, quando são comparados aos sistemas que envolvem somente dois corpos.

1.3. Ensaio de Desgaste Abrasivo

A norma ASTM G65-04 (2010) *Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*, determina que a gravidade do desgaste abrasivo em qualquer sistema depende de alguns fatores, tais como: o tamanho das partículas abrasivas, o tipo do abrasivo, a forma física da partícula desse abrasivo, a dureza (HV), a magnitude da tensão aplicada sobre partícula contra a superfície de interesse e a frequência de contato da partícula abrasiva. Para medição do teste de abrasão acelerada é utilizado o mecanismo tribológico conhecido como roda de borracha e areia. A Fig. 2 apresenta um esquema de funcionamento do abrasômetro proposto pela norma ASTM G65.

Conforme a norma ASTM G65-04, o teste deve ser feito com a areia seca. O abrasivo flui constantemente entre a roda de borracha e a face superficial do corpo de prova. A amostra é pressionada contra a roda giratória com uma força tangencial, a qual é exercida pela ação do braço de alavanca, enquanto que

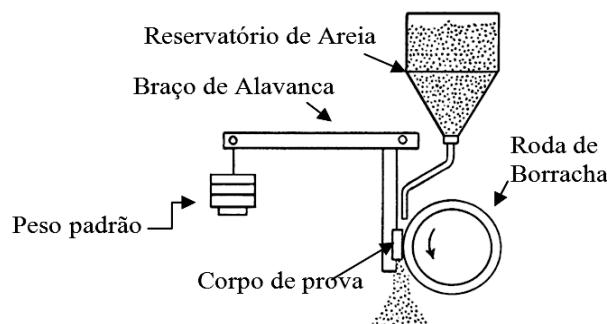


Fig. 2. Esquema de funcionamento do equipamento de ensaio abrasômetro. Adaptado de ASTM G65-04, 2010.

o fluxo controlado do abrasivo ataca e promove o desgaste a superfície de interesse. O sentido de giro da roda deve ser no mesmo sentido do fluxo abrasivo. As amostras são expostas ao ensaio, sempre no mesmo tempo de fricção. A metodologia prevê que a massa da amostra deve ser pesada antes e depois do teste, assim, a perda de massa é registrada. É necessário converter a perda de massa volumétrica em milímetro ou centímetro cúbico, devido as grandes diferenças na densidade dos materiais. A resistência à abrasão de diferentes materiais e processos de desgaste superficial podem ser comparadas, com a análise da perda de volume dos corpos de provas.

1.4. Soldagem de Revestimento Duro

A norma técnica internacional AWS A3.0 (2010), *Standard Welding Terms and Definitions*, define que os materiais para revestimento superficiais podem ser aplicados por soldagem, brasagem ou aspersão térmica. O intuito é depositar uma camada de material específico sobre uma superfície, a fim de obter propriedades e dimensões diferentes do substrato.

Segundo Mondenesi (2012), a soldagem no sentido de recuperação superficial, ocorre com a deposição de um algum tipo de revestimento metálico sobre a área afetada, a fim de combater a origem da ação agressiva. Entre os diferentes tipos de processos de soldagem, o processo por fusão é um dos mais utilizados. Sendo assim, a soldagem de revestimento consiste na aplicação localizada de uma fonte de calor, até que ocorra de forma controlada, uma diluição por fusão do metal de base com o metal de adição, e a formação subsequente de camadas compostas somente pelo material do revestimento.

Conforme Wainer et al (2004), os processos de soldagem mais utilizados na deposição de revestimento duros são: soldagem por eletrodo revestido e soldagem por arame tubular. Nesses casos os materiais dos revestimentos são fornecidos comercialmente na forma de varetas ou bobinas. No processo de soldagem a arco elétrico com eletrodos revestidos SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), os consumíveis apresentam-se como varetas, cuja alma metálica é constituída de uma composição química especial, onde a solda produzida por esse eletrodo revestido apresenta as propriedades mecânicas exigidas no projeto. Em alguns casos o revestimento dos eletrodos revestidos pode introduzir na poça de fusão, o elemento químico especial de interesse. Já no processo de soldagem a arco elétrico por arame tubular FCAW (*Flux Cored Arc Welding*), o consumível é fornecido em bobinas, cuja a composição química apresenta as características de revestimento duro.

Batista et al (2004), argumenta que os materiais do revestimento duro podem ser aplicados em peças novas e também na recuperação de peças já desgastadas pelo uso. A escolha do revestimento ideal e do processo de aplicação deve considerar fatores de custo e eficiência em médio e longo prazo, tendo em vista as limitações e especialidades de cada revestimento e processo. Sendo assim, a soldagem de recobrimento apresenta-se com vantagem, ao ser aplicado em áreas localizadas da peça de diferentes tamanhos, a que estão sujeitas aos mecanismos de desgaste.

No estudo de Castro (2010), o revestimento duro AWS A5.13 EFeCr-A (UTP-Ledurit 61), é um eletrodo revestido tipo rutílico alta liga, devido ao alto teor de carbonetos de cromo observados nos depósitos soldados. Este tipo de revestimento duro é indicado nos casos onde ocorre desgaste abrasivo severo. Já Macedo (2008), em seu estudo determina que o consumível AWS A5.29 E81T1-B2C (Tubrod 81B2), é um arame tubular baixa liga de fluxo interno tipo rutílico, que deposita 1,2% de Cr e 0,5% de Mo na poça de fusão. Este apresenta uma aplicação mais voltada para o recobrimento superficial, no âmbito de recuperação dimensional de peças.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia consiste na análise do desgaste abrasivo, do revestimento duro com base de carboneto de cromo, o qual foi depositado por eletrodo revestido com 1 (uma) e 2 (duas) camadas de deposição. O procedimento de soldagem dos corpos de prova, ocorreu de forma similar ao processo de soldagem praticado pelo setor de manutenção da empresa Carbonífera Rio Deserto, a fim de obter resultados da taxa de desgaste o mais próximo ao que ocorre na realidade industrial.

Para a análise de desgaste abrasivo ASTM G65, foram utilizados 20 (vinte) corpos de prova (metal base) de chapas do aço média liga Hardox 450 e aço carbono SAE 1020. As dimensões nominais do corpo

Tabela 1. Composição química do aço Hardox-450 e SAE 1020. Fonte: SENAI-Campus Criciúma-SC.

Material	Elementos químicos (% em peso)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
Hardox-450	0,23	1,65	1,38	0,02	0,01	1,29	1,43	0,51	0,005
SAE 1020	0,19	---	0,52	0,04	0,05	---	---	---	---

Tabela 2. Composição química do revestimento FCAW e SMAW. Fonte: SENAI-Campus Criciúma-SC.

Consumível de soldagem	Elementos químicos (% em peso)					
	C	Si	Cr	Mn	Ni	Mo
Tubrod 81B2	0,03	0,42	1,17	1,03	1,43	0,39
UTP-Ledurit 61	3,18	0,95	27,8	---	---	---

Tabela 3. Identificação das amostras.

CP	Denominação	Identificação	Ensaio
1	Hardox 450	A	Microestrutural
		B; C; D	ASTM G65
2	Hardox 450 + UTP-Ledurit 61 (1 Passe)	A	Microestrutural
		B; C; D	ASTM G65
3	Hardox 450 + UTP-Ledurit 61 (2 Passes)	A	Microestrutural
		B; C; D	ASTM G65
4	SAE 1020 + UTP-Ledurit 61 (1 Passe)	A	Microestrutural
		B; C; D	ASTM G65
5	SAE 1020 + UTP-Ledurit 61 (2 Passes)	A	Microestrutural
		B; C; D	ASTM G65

Tabela 4. Parâmetros de soldagem FCAW.

Parâmetros	Corrente	Tensão	Vazão do gás de proteção	Velocidade do arame
Valores nominais	248 A	25 V	12 l/min	7 m/min

de prova são: 26x46x10 mm. A tabela 1 apresenta a composição química dos metais de base utilizados nesse estudo.

Alguns corpos de prova foram pré-revestidos pelo processo FCAW no intuito de simular a recuperação da superfície desgastada, tal como ocorre as recuperações observadas na prática. Nessa soldagem foi utilizado o consumível comercial Tubrod 81B2 de diâmetro 1,6 mm. Sobre as superfícies soldadas foram aplicados o revestimento duro a base de cromo, utilizando o consumível comercial UTP-Ledurit 61 de diâmetro 4 mm depositado pelo processo SMAW. A tabela 2 apresenta a composição química dos revestimentos utilizados nesse estudo.

A tabela 3 apresenta a identificação dos Corpos de Prova (CP) selecionados para o estudo de resistência ao desgaste abrasivo e microestrutural da camada de revestimento duro.

Inicialmente cada corpo de prova foi fixado a um suporte (gabarito), para evitar o empelo dos corpos de prova durante o processo de soldagem do pré-revestimento e revestimento duro.

Na sequência as faces de interesse foram devidamente limpas. Nessa etapa da metodologia foi utilizado o desbaste manual, com lixadeira e disco abrasivo.

Com a finalização das preparações dos corpos de prova iniciou-se os procedimentos de soldagem. O equipamento utilizado para depositar o pré-revestimento FCAW foi um transformador de tensão ESAB LAI 550 e o gás de proteção AWS A5.32 SG-C (100% CO₂). Na tabela 4 é observado os parâmetros de soldagem utilizados.

Já na deposição do revestimento duro SMAW foi utilizado um retificador de solda convencional, e os parâmetros de soldagem corrente (126 A) e tensão (23 V).

Tabela 5. Parâmetros do ensaio ASTM G65.

Parâmetro	Valor nominal
Rotação da roda de borracha	200 rpm
Vazão da areia	352 g/min
Tempo de ensaio	30 min
Granulometria da areia	246,67± 66,71 µm
Temperatura de secagem da areia	120 °C
Carga aplicada no ensaio	130 N
Abrasão linear	4309 m
Revolução da roda	12000 voltas/min

Todas as amostras foram soldadas na posição plana. A soldagem ocorreu na Metalúrgica da empresa Carbonífera Rio Deserto, onde os passes do revestimento duro foram depositados, um subsequente ao outro, sem o devido resfriamento do primeiro passe, nem a limpeza da escória entre passes. Esta especificação do procedimento de soldagem foi adotada, com o intuito de simular as condições de soldagem que atualmente é empregada pela Carbonífera Rio Deserto.

Após a soldagem do revestimento duro, as amostras passaram pelo processo de retificação da superfície, adequando a face superficial do revestimento duro aos requisitos de planeza e rugosidade exigido pela norma ASTM G65. Neste processo de usinagem foi utilizado uma retífica plana laminadora Mello P36 nas dependências da Faculdade SATC. Na retificação utilizou-se baixo avanço de corte e constante refrigeração, estas medidas foram tomadas para evitar mudança microestrutural da superfície das amostras.

A sequência do estudo do desgaste abrasivo, seguiu-se com a limpeza ultrassônica inicial de cada corpo de prova (10 minutos), secagem, pesagem inicial do corpo de prova, execução do ensaio ASTM G65 (30 minutos), limpeza ultrassônica após ensaio (10 minutos), secagem e pesagem final dos corpos de prova.

Para os testes de abrasão foi utilizado o equipamento Abrasômetro do tipo roda de borracha e areia, o qual foi construído conforme os requisitos da norma ASTM G65-04, 2010. Os testes forem executados pelo LDS (Laboratório de Degaste de Superfície) da Faculdade SATC.

A norma ASTM G65 subdivide-se em 4 (quatro) procedimentos, os quais determinam os parâmetros para realização do ensaio. Na tabela 5 são observados os parâmetros utilizados neste estudo.

Na análise da perda de massa, foi utilizado uma balança analítica Sartorius modelo ED224S-OCE, com precisão de 0,1mg. Para calcular a taxa de desgaste abrasivo utiliza-se a Eq. 1, a qual determina a perda de volume. No cálculo foi adotado o valor de 7,8 g/cm³, para a densidade do revestimento duro e chapa Hardox 450 (substrato), conforme especificado pelos fabricantes:

$$Q' = \frac{\left[\left(\frac{M_i - M_f}{\rho} \right) \times 1000 \right]}{4309} \quad (1)$$

onde: Q'(mm³/m) é taxa volumétrica de desgaste abrasivo; M_i(g) é a massa inicial da amostra; M_f(g) é a massa final da amostra; e ρ(g/cm³) é densidade do revestimento duro ou substrato.

Para a análise microestrutural, as amostras foram seccionadas transversalmente no centro do corpo de prova. Nesta etapa foi utilizado uma policorte metalográfica com disco de diamante. Em seguida foi realizado o embutimento a frio em resina plástica, após a cura da resina. A superfície transversal de cada corpo de prova foi preparada conforme a técnica convencional de metalografia. Todas as atividades de metalografia foram desenvolvidas no Laboratório de Caracterização Microestrutural (LACAMI – SATC).

Para a análise de microdureza, foi utilizado o Microdurômetro Shimadzu, submetido a uma carga de 1,961 N com 8 segundos de duração para obter a dureza Vickers (HV). As indentações prismáticas foram efetuadas de forma vertical, afim de observar diferenças do perfil de microdureza dos casos estudados. A análise iniciou na camada do pré-revestimento (AWS E81T1-B2C) identificado pelo ponto 1, até o reves-

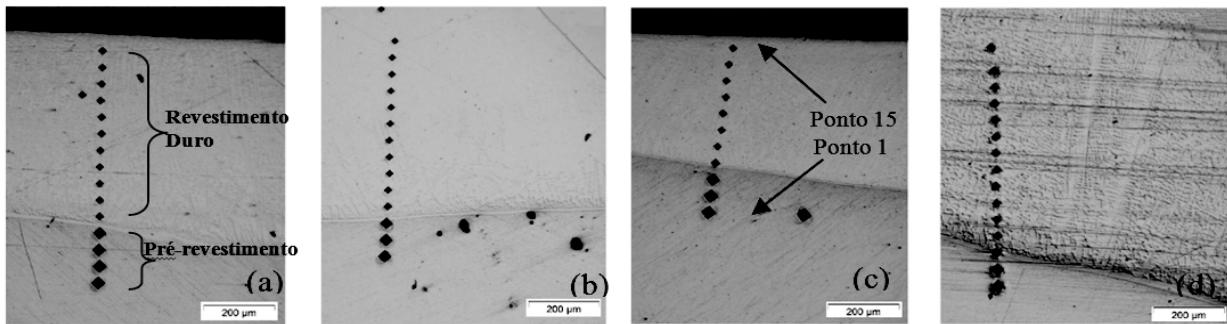


Fig. 3. Perfil de microdureza. (a) CP2A; (b) CP3A; (c) CP4A; (d) CP5A.

timento duro (AWS A5.13 EFeCr-A1) identificado pelo ponto 15. Na Fig. 3 pode ser observado a forma de análise adotada.

Para análise da dureza superficial Rockwell (HRc) foi utilizado um durômetro de bancada com medida analógica do fabricante Microtest. Nesse equipamento, foi aplicado a carga de 150 kg e o endentador tipo cone de diamante 120°. As 10 endentações de cada corpo de prova, foram executadas sobre a superfície retificada de forma alinhada e no dentro do cordão de solda. As endentações tiveram o tempo de individual de 30 segundos de ação da carga. Essa metodologia foi executada dentro LDS da Faculdade SATC.

3. RESULTADOS E ANÁLISES

A análise de dureza superficial, revelou que a estrutura martensítica do revestimento duro, com dois passes de deposição, apresenta maior incide de dureza (HRc), quando são comparados com as amostras do mesmo tipo de revestimentos duro depositado com somente um passe. A tabela 7 apresenta os valores observados, onde as durezas dos CP3A e CP5A estão de acordo com o fabricante do eletrodo revestido.

A maior dureza superficial (HRc) pode ser atribuída ao fato da maior concentração de calor no material do revestimento duro durante a deposição, devido à pequena área de troca térmica oferecida pela amostra. Dessa forma a solidificação da poça de fusão ocorre pelo crescimento epitaxial dos grãos, refinando o tamanho deste, tornando a microestrutura mais uniforme e compacta, além de proporcionar maior formação de carbonetos de cromo.

Na Fig. 4 se observa o perfil de microdureza Vickers (HV) das amostras. Nessa análise fica evidenciado que a aplicação do segundo passe de soldagem do revestimento duro AWS A5.13 EFeCr-A1 (UTP-Ledurit 61) é de suma importância, para a obtenção de uma microestrutura de maior dureza.

A maior microdureza (HV) das amostras CP3A (Hardox + 2 passes) e CP5A (SAE 1020 + 2 passes) confere a estes corpos de prova, a maior dureza superficial (HRc). Sendo assim, também pode-se atribuir à esta evidência, o fato da ocorrência da menor diluição do material do revestimento duro com o material

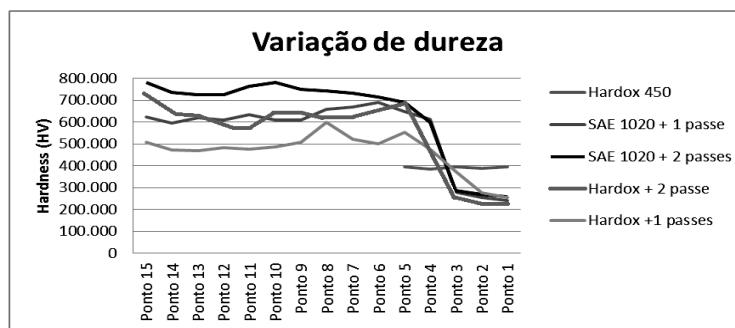


Fig. 4. Análise de microdureza (HV).

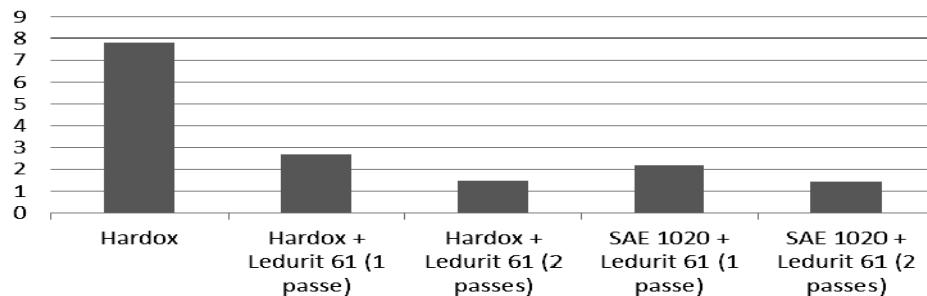
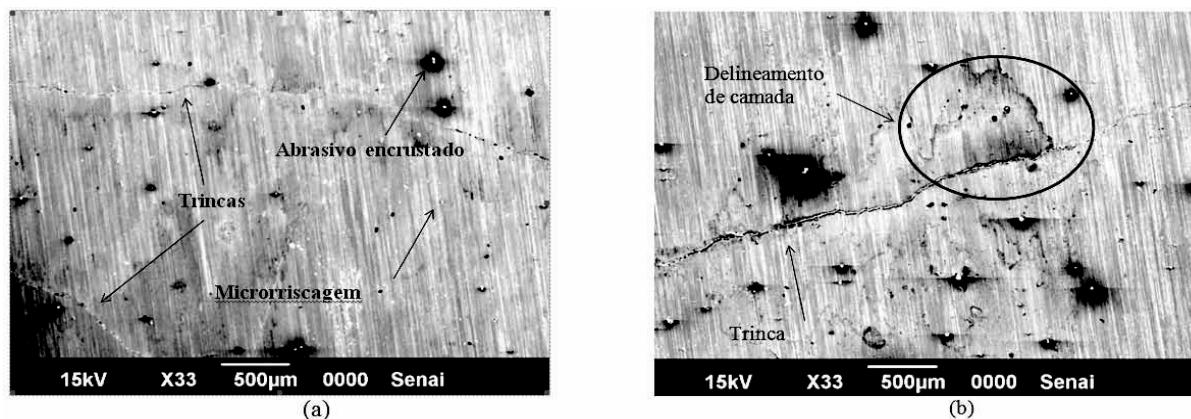
Fig. 5. Taxa de desgaste abrasivo ($\text{mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$).

Fig. 6. A análise MEV a) da face desgastada CP2C (Hardox +1 passe), b) da face desgastada CP4C(SAE 1020 +1 passe).

do pré-revestimento. Dessa forma, o segundo passe apresenta uma característica química mais próxima do material que constitui a alma do eletrodo revestido elevando assim, a dureza superficial do cordão de solda.

O resultado do ensaio ASTM G65, o qual pode ser visualizado no gráfico da Fig. 5, mostra que os corpos de prova do grupo 3 e 5 apresentaram a menor taxa de desgaste.

O substrato em aço SAE 1020 revestido, se mostrou como uma alternativa para a substituir o material Hardox 450, o qual é atualmente utilizado na caixa do chassi do equipamento Minerador Contínuo. Pois foi observado que a taxa de desgaste é praticamente a mesma, que o material aço Hardox 450 revestido. No entanto, a alta taxa de desgaste do aço SAE 1020 ($9,19 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$) em relação ao aço Hardox 450 ($7,84 \text{ mm}^3/\text{m} \times 10^{-3}$) é a característica pontual de desgaste operacional. O material da caixa do chassi sofre durante o escoamento dos detritos extraídos em toda sua área, a qual limita tecnicamente o emprego do material SAE 1020, pois entende-se que o aço SAE 1020 teria pontos ou áreas de desgaste que nunca foram afetadas. Com isso, um custo maior de manutenção seria observado. A maior dureza do aço Hardox 450, em relação as características do aço SAE 1020 evidência sua maior resistência à abrasão, e por consequência sua maior durabilidade operacional, nas áreas onde não são aplicados o revestimento duro.

A análise MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura), sobre a superfície da face desgastada do revestimento duro AWS A5.13 EFeCr-A1 (UTP-Ledurit 61) das amostras CP2C e CP4C, mostram a formação de trincas transversais na microestrutura do revestimento duro. O ensaio ASTM G65 apresenta como mecanismo de desgaste abrasivo, o microriscamento da superfície exposta no ensaio. Tanto o problema estrutural, quanto os mecanismos de desgaste podem ser observados na Fig. 6a.

As trincas estariam relacionadas com o alívio da tensão superficial, o qual ocorre no processo de solidificação da poça de fusão. Esse defeito estrutural é típico de materiais que apresentam elevado grau de dureza. Nesse caso, a formação e propagação de trincas superficiais está relacionada a dois fatores: o

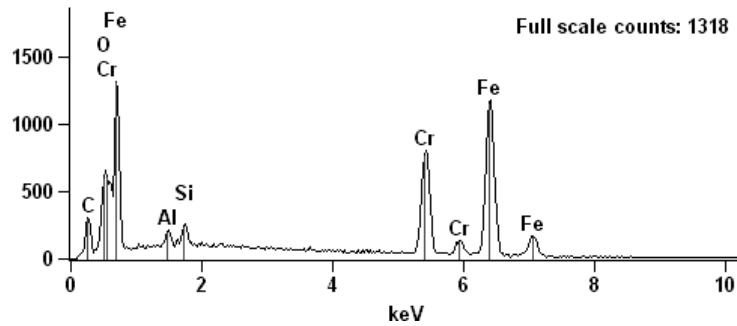


Fig. 7. Análise de EDS CP2C. Fonte: Senai.

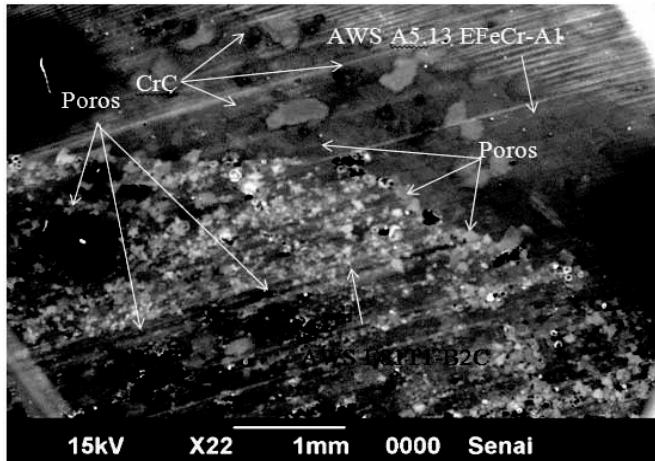


Fig. 8. MEV CP3A. Fonte: Senai.

primeiro é a característica de baixa tenacidade da microestrutura dos cordões de solda, e o segundo é a alta taxa de deformação inferidas pelo forte ciclo térmico oriundos do arco elétrico. Já o microrriscamento tem sua origem no atrito nas arestas cortantes, as quais são encontradas na superfície da partícula abrasiva (areia). A fragilização da microestrutura por trincas aceleraria o processo de desgaste abrasivo, uma vez que grandes volumes de material, da superfície do revestimento, podem ser bruscamente removidos por delineamento de camada, conforme é demonstrado na Fig. 6b. Nesse caso a trinca pode estar influenciando na integridade superficial de uma área vizinha, e esse fator pode corroborar para a fragilização de uma área ainda maior, onde a constante carga do ensaio degrada mais facilmente essa região fraturada.

A análise de EDS (Espectrografia por Energia Dispersiva) do CP2C apresenta uma concentração de silício maior que o normal, para o revestimento duro AWS A5.13 EFeCr-A1, conforme observação do gráfico da Fig. 7.

Possivelmente o material do abrasivo (areia) contribuiu para a elevação do pico de concentração do elemento químico silício na amostra analisada, uma vez que é observado incrustação de partículas de areia na superfície desgastada (Fig. 6a).

O fato de ser observado linhas de desgaste padronizadas e incrustações do abrasivo na superfície do CP2C, confirmam a microrriscagem como o mecanismo de desgaste empregado pelo ensaio ASTM G65. Esse mecanismo de desgaste acontece mediante ao esforço de corte, devido a que as arestas do abrasivo imprimem contra a superfície de análise. Isso provoca o arranque linear e progressivo de material, formando assim, as linhas de desgaste paralelas.

A análise MEV da seção transversal do CP3A (Fig. 8) evidencia a existência de uma linha bem definida entre as interfaces metálicas do revestimento duro (AWS A5.13 EFeCr-A1), e pré revestimento (AWS E81T1-B2C). No entanto, quando se analisa a linha de fusão entre os revestimentos é conformada a dilui-

ção entre os mesmos. Isso é um indício que justifica o menor índice de dureza superficial das amostras do grupo 2 e 4, bem como o baixo desempenho dos mesmos grupos de amostras, frente ao ensaio de abrasão acelerada. Também é observado as placas de carbonetos de cromo (CrC) na camada de revestimento duro.

Na camada de pré-revestimento AWS E81T1-B2C é observado uma microestrutura de grãos finos, e faixas estruturais identificadas neste estudo com poros. Atribui-se ao refino de grão e à ação de temperatura dos passes subsequentes do revestimento duro. A baixa troca térmica da amostra por condução corrobora para a retenção de calor, e este efeito assume uma característica de tratamento térmico de recozimento pós soldagem. Esse fator também está associado ao arrefecimento lento do cordão de solda por convecção, pois a escória do revestimento duro depositado por SMAW age como manta térmica.

Na interface dos revestimentos (Fig. 8) também são observados poros, os quais em elevado índice podem inibir um melhor ancoramento entre os revestimentos depositados. Esses poros podem ser formados pelo aprisionamento do gás de proteção (CO_2) durante o processo de deposição dos revestimentos, ou pela reação de oxidação da poça de fusão.

4. CONCLUSÕES

Os ensaios de manutenção de superfícies desgastadas por abrasão com solda usando a técnica de deposição de soldadura com eletrodos revestidos apresentaram as seguintes conclusões:

- A utilização do segundo passe do revestimento duro AWS A5.13 EFeCr-A1 apresenta um aumento máximo de 66% da resistência ao desgaste por abrasão.
- A maior resistência à abrasão do revestimento duro AWS A5.13 EFeCr-A1 está relacionada com o maior índice de microdureza.
- A camada superficial com segundo passe de deposição do revestimento duro não apresenta contaminação da sua microestrutura, por parte do pré-revestimento e isso garante ao cordão de solda uma maior formação de carbonetos de cromo na sua superfície.
- O pré-revestimento apresenta maior índice de poros na sua microestrutura, em comparação com a microestrutura do revestimento duro.
- O processo de microrriscagem é o tipo de mecanismo de desgaste observado na superfície do revestimento duro AWS A5.13 EFeCr-A1, o qual foi executado pelo ensaio ASTM G65 padronizado.
- A maior taxa de remoção de material da superfície do revestimento duro pode ocorrer por delinearmento de camada, a qual normalmente ocorre em áreas próximas as trincas da superfície.

REFERENCIAS

- [1] ASTM G65-04: Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. Philadelphia (2010)
- [2] AWS A3.0. Standard Welding Terms and Definitions. American Welding Society. Miami, FL (2010)
- [3] Batista, A.L.B., Nascimento, I.A., “Revestimentos duros resistentes ao desgaste depositados por soldagem utilizados na recuperação de elementos de máquinas”, *Spectru Instrumental Científico* (2004)
- [4] Bressan, J.D., Hesse, R., Silva, E.M., “Abrasive wear behavior of high speed steel and hard metal coated with TiAlN and TiCN”, *Mechanic International Journal of the Italian Association of Theoretical and Applied Mechanics*, 1, 1-8 (2001)
- [5] Castro, C.A.F., Resistência ao desgaste abrasivo das sapatas de trator de esteira após processo de recuperação. 2010. 92f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais do Departamento de pesquisa e Pós-Graduação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba (2010)
- [6] Macedo, B.P.N., Gallego, J., “Simulação do processo de soldagem com arame tubular para deposição de revestimentos duros a base de diferentes carbonetos”, Congresso nacional de estudantes de engenharia mecânica. Curitiba, PR (2008)

- [7] Marques, P.V., Modenesi, P.J., Bracarense, A.Q., *Soldagem: Fundamentos e Tecnologias*. 2ed. Editora UFMG, Belo Horizonte (2007)
- [8] Modenesi, P.J., Marques, P.V., Santos, D.B., Introdução à metalurgia da soldagem. UFMG, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais-Demet. Belo Horizonte, MG (2012)
- [9] Oliveira, M.L.S. et al., “Mineralogy and leaching characteristics of beneficiated coal products from Santa Catarina, Brazil”, *International Journal of Coal Geology*, 94, 314-325 (2012)
- [10] Pascoali, S., Introdução ao Desgaste Abrasivo. Tese de Doutorado. Pós-Graduação em Materiais PGMAT/UFSC, Florianópolis, SC (2004)
- [11] Ratia, V., Miettunen, I., Kuokkala, V., Surface deformation of steels in impact-abrasion: the effect of sample angle and test duration, Tampere University of Technology, Department of Materials Science, Tampere Wear Center. Tampere, Finland (2013)
- [12] Wainer, E., Brandi, S.D., Mello, F.D.H., *Soldagem : Processo e Metalurgia*, Edgard Blücher, São Paulo (2004)

ABRASIVE WEAR ANALYSIS OF HARD COATING CARBIDES BASE CHROME DEPOSITED BY SMAW

Abstract – Difficulties encountered in the coalmine, often not is economic resources, but the operational performance requiring the maintenance of the machines. The surface of the machines that carry out mining activities is subject to severe abrasive wear, which occurs violently and response with quick maintenance for not stopping the machine. The concert with solder widely used in the mine, and is to restore the worn surfaces. The repair realized with the deposition technique of welding process SMAW (Shielded Metal Arc Welding), using 61-UTP Ledurit electrode. The experimental study carried out on samples with abrasive wear according to ASTM G65. The plate samples subjected to sliding of the abrasive material subjected to the pressure sand through a rotating rubber wheel. In trials analyzes the performance of the welding electrode coated with one and two array of passes on the sample surface. The materials used as the substrate in the deposition welding are Hardox plates 450 and SAE 1020. Tests show that with two welding passes, one subsequent to the other, the welding Ledurit coating material UTP-61, had a higher yield.

Keywords – Abrasive wear, SMAW Process, Testing ASTM G65.