

DESEMPENHO DE REVESTIMENTOS DE SOLDA DURA SOB ENSAIOS DE ABRASÃO-IMPACTO, EVITANDO-SE OS EFEITOS DE ARESTA SOBRE A PERDA DE MASSA

OMAR MALUF CANNIZZA¹, EDUARDO CANNIZZA², ROSAMEL MELITA MUÑOZ RIOFANO³, MAURICIO ANGELONI⁴

¹Fatec Sertãozinho – Mecânica: Processo de Soldagem; ²EHT Consultoria; ³Fatec Sertãozinho – Manutenção Industrial; ⁴Fatec Sertãozinho – Manutenção Industrial

*omar.maluf@fatec.sp.gov.br

Performance of Hardfacing Coating under Abrasion-Impact Testing while Avoiding Edge Effects on Mass Loss

Eixo Tecnológico: Engenharia de Materiais e Metalurgia

Resumo

Os estudos que vem sendo desenvolvidos, em projetos de pesquisa aplicada, na Fatec – Campus de Sertãozinho tem abordado temas ligados a revestimentos, aplicados sobre metal base, que visam aumentar a resistência de componentes aos fenômenos tribológicos, a que são submetidos em equipamentos de plantas industriais. Não foi diferente desta feita, quando se submeteu revestimentos de elevada dureza, obtidos por depósitos de solda, a ensaios de abrasão-impacto, além de análises químicas e metalográficas ópticas. Os corpos de prova revestidos a partir de consumíveis comerciais de solda (16 Tipos), disponíveis no mercado, foram adequados, por eletroerosão a fio e retífica, e submetidos aos experimentos. Vale salientar, que se buscou comparar o desempenho de revestimentos que contém, ou não, o elemento nióbio na composição química, bem como o efeito de borda nos ensaios abrasão-impacto (AI). Observou-se, principalmente, os resultados dos ensaios de AI, realizados, conforme proposto, com os corpos de prova alojados em dispositivos protetores de arestas, comparando-os com aqueles dos experimentos realizados, em fase anterior, sem o referido dispositivo, mas com mesma angulação, de maneira a comprovar o efeito deletério das arestas sobre a perda de massa. Realizou-se os ensaios de abrasão impacto com ângulo de 90°, para a exposição das superfícies, pois este revelou-se o mais agressivo. O tempo de exposição foi de 30 minutos, com o abrasivo, coríndon marrom, granulometria de 5 a 10 mm, substituído a cada 10 minutos (1 kg). Observando-se os resultados das análises químicas e metalografias ópticas, percebe-se o efeito benéfico que o nióbio tem sobre a tenacidade ao impacto repetitivo e, conforme esperado, fica nítido que o dispositivo protetor de arestas reduz sensivelmente a perda de massa no ensaio, aumentando a probabilidade de identificar os outros fenômenos que influenciam o desgaste. Os parâmetros dos ensaios de AI, determinados anteriormente, revelaram-se adequados para esse estudo. anteriormente, revelaram-se adequados para esse estudo.

Palavras-chave: *Abrasão-impacto, Protetor de borda, Coríndon marrom, Nióbio, Consumíveis de solda.*

Abstract

The studies that have been developed in applied research projects at Fatec – Sertãozinho Campus have addressed issues related to coatings, applied on base metal, which aim to increase the resistance of components to tribological phenomena, to which they are subjected in industrial plant equipment. It was no different this time, when high hardness coatings, obtained by welding deposits, were subjected to abrasion-impact tests, in addition to chemical and optical metallographic analyses. The specimens coated from commercial welding consumables (16 types), available in the market, were adapted by wire EDM and grinding, and submitted to the experiments. It is worth noting that we sought to compare the performance of coatings that contain, or not, the element niobium in the chemical composition, as well as the edge effect in the abrasion-impact (IA) tests. Observing the results of chemical analyses and optical metallographies, the beneficial effect that niobium has on the toughness to repetitive impact is perceived and, as expected, it is clear that the edge protective device significantly reduces the loss of mass in the test, increasing the probability of identifying the other phenomena that influence wear. The parameters of the IA assays, previously determined, proved to be adequate for this study.

Key-words: *Abrasion-impact, Edge protector, Brown corundum, Niobium, Welding consumables.*

1. Introdução

Na indústria de mineração, o desgaste excessivo de componentes devido ao contato contínuo com partículas abrasivas é uma das principais causas de paradas não programadas, aumentando os custos de manutenção, além de ampliar os impactos ambientais das operações de mineração [1]. Problemas de desgaste são críticos em chutes de transferência usados para transportar materiais a granel, representando aproximadamente 40% da manutenção e dos custos operacionais. Ambas as condições de impacto e abrasão podem ser identificadas em chutes de transferência, realizando análises tribológicas de alta complexidade [2], tal como ensaios de desgaste tipo abrasão-impacto.

O desgaste abrasão-impacto inclui os efeitos da colisão de partículas abrasivas com a superfície sólida e movimentos ao risco; outros fatores, como tamanho das partículas, formato, ambiente e taxa de impacto e abrasão, juntos, tornam este um problema complexo [3]. O fenômeno é importante nos aços resistentes ao desgaste utilizados em equipamentos de movimentação de terras, como escavadeiras e carregadeiras, e em máquinas utilizadas em operações de mineração. A abrasão se correlaciona fortemente com a dureza, embora esteja bem estabelecido que a dureza, por si só, nem sempre explica o comportamento do desgaste [4-7].

Durante o desgaste abrasivo, a remoção de material da superfície ocorre quando a deformação atinge um valor crítico. Esta deformação de fratura local pode ser alcançada por um único ou múltiplos impactos abrasivos na superfície. O material não removido desta forma pode, no entanto, deformar-se como resultado do evento de abrasão e impacto [8]. Portanto, aços com grande tensão de fratura e taxa de endurecimento têm alta resistência ao desgaste. O aço Hadfield é resistente ao desgaste devido à sua alta capacidade de endurecimento, mas quando usado para britagem de minério, sofre severamente com o desgaste abrasivo por impacto [9]. Isto ocorre porque este tipo de desgaste pode ser dominado por fissuras microscópicas resultantes da combinação de plasticidade e impacto, enfatizando a necessidade de considerar a tenacidade como um parâmetro no controle da remoção de material [10].

Segundo os autores [11-12], o desgaste causado por abrasão-impacto não é uniforme nas superfícies da amostra (Fig. 1).

Fig. 1 - Amostras antes e depois do ensaio de desgaste abrasão-impacto.



Fonte: (Chintha *et al.*, 2019) [13].

Com o desgaste das bordas, a geometria mudará devido ao "escorregamento" fácil do abrasivo sobre a superfície, pois depois de impactos sucessivos entre os corpos, o abrasivo começa a retirar material da lateral da amostra. Na Figura 1 pode-se perceber a mudança de geometria da amostra tornando suas bordas arredondadas. Para solucionar esse problema, se projetará, para os ensaios aqui propostos, um dispositivo de proteção de borda. O intuito é garantir que os dados de perda de massa e os mecanismos de desgastes ocorridos sejam reproduzidos, o mais próximo possível do que acontece durante as operações.

O objetivo deste trabalho, foi avaliar o efeito que as arestas têm sobre a perda de massa em ensaio de desgaste tipo abrasão-impacto. O desenvolvimento desta pesquisa visa, basicamente, avaliar, além do efeito geométrico, o efeito dos elementos de liga sobre a microestrutura e,

consequentemente, sobre as propriedades de revestimentos de solda dura quando submetidos a ensaios tribológicos.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

Chapas de aço AISI A36, foram usadas como material base para deposição dos revestimentos por solda. Para os ensaios de desgaste abrasão-impacto foram cortados corpos de prova, com dimensões de 75mmx25mmx12mm. Um total de 16 tipos de consumíveis comerciais, com e sem Nb, foram caracterizados em termos de resistência ao desgaste (Tab. 1).

Tab 1. – Dados de teor de C, Nb, Cr e dureza HRC por consumível.

Consumível	Corpos de prova	C (%)	Nb (%)	Cr (%)	Dureza (HRC)
Arame	01	3,5	5,0	20,0	63
	02	4,4	-	23,0	57
	03	4,6	2,8	15,7	65
	07	3,4	5,1	19,0	59
	08	3,4	-	33,7	57
	11	3,3	-	19,4	59
	13	3,4	3,6	20,0	56
	27	3,9	2,9	17,2	61
	28	4,4	-	17,0	61
Eletrodo	05	6,5	-	27,6	64
	06	3,9	4,8	24,6	63
	14	2,8	-	22,2	57
	15	2,8	6,6	18,1	59
	25	6,0	-	35,3	65
	26	44,0	8,1	22,6	60

Fonte: (Os Autores, 2025).

2.2. Metodologia

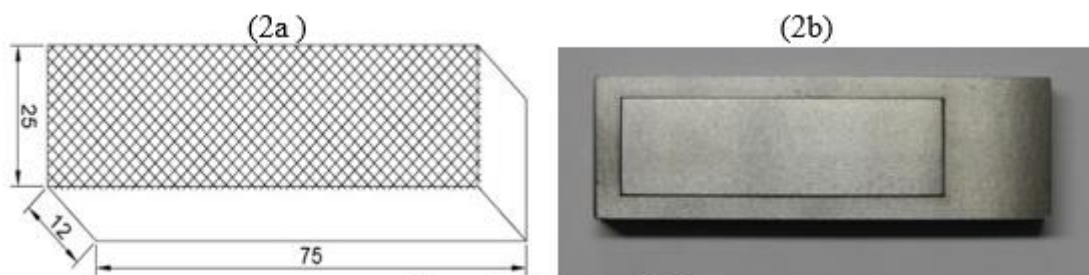
Foram extraídas amostras das chapas revestidas para se efetuar a avaliação microestrutural dos revestimentos. Para tal, as amostras foram embutidas, lixadas, polidas e posteriormente atacadas com reagente Nital 2%. Para a medição de dureza, foi utilizado um Durômetro de bancada, tipo Rockwell C, com carga de 150kg.

Os ensaios de desgaste abrasão-impacto foram realizados em corpos de prova, segundo medidas (75mm x 25mm x 12mm) que permitissem a inserção deles no dispositivo de proteção de borda (Fig. 2a). O dispositivo protetor de borda (arestas) foi projetado, produzido em aço VC 131 (Fig. 2b) e, em seguida, temperado e revenido.

Os ensaios de abrasão-impacto foram realizados em aparato próprio, utilizando o dispositivo de proteção de borda, pertencente ao Laboratório de Tribologia da Faculdade Estadual de Tecnologia - Campus de Sertãozinho (Fig. 3). Utilizou-se como abrasivo o Corindon marrom (granulometria de 5-10mm), com tempo de ensaio de 30min, rotação do tambor de 40Hz, rotação do eixo de 60Hz e conduzidos com angulação de 90°.

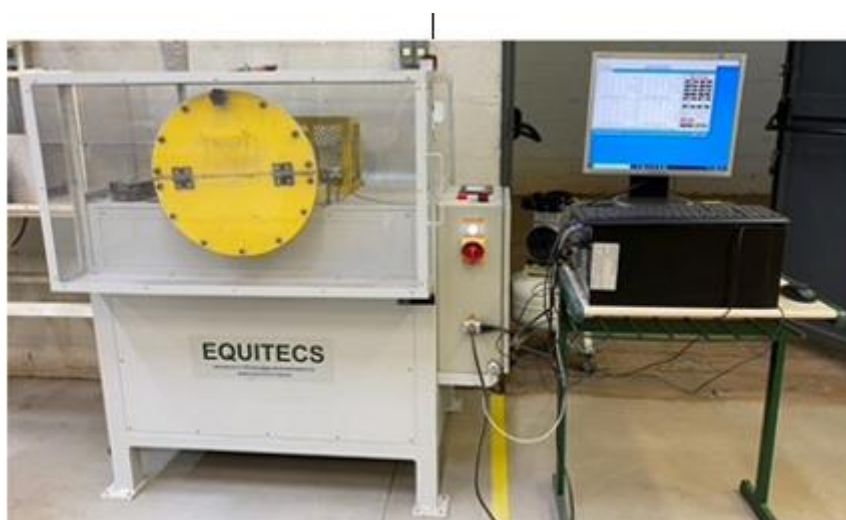
Os desgastes abrasão-impacto foram avaliados em função da perda de peso dos corpos de prova comparando os pesos antes e após o ensaio, utilizando uma balança de precisão.

Fig. 2 – Croqui do corpo de prova revestido (2a) e vista do corpo de prova instalado no dispositivo de proteção de bordas (2b), para o ensaio de desgaste abrasão-impacto.



Fonte: (Os Autores, 2025).

Fig. 3 – Equipamento abrasão-impacto, com aquisição de dados.



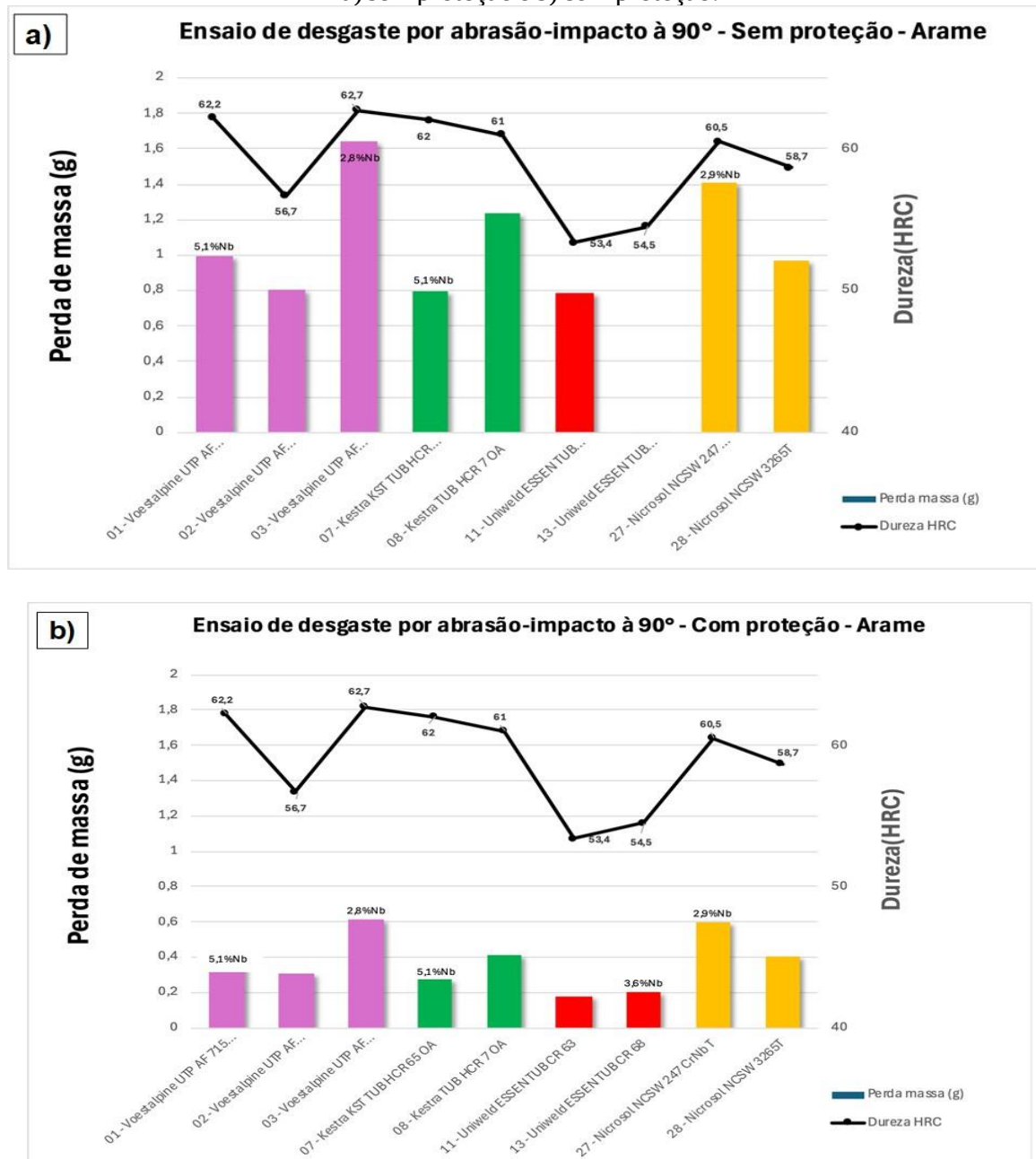
Fonte: (Os Autores, 2025).

3. Resultados e Discussão

A análise dos dados coletados possibilitou a comparação do desempenho de cada revestimento, avaliando a perda de massa com e sem o uso do dispositivo protetor de borda. A maior perda de massa foi observada quando o ensaio transcorreu sem a proteção do dispositivo, pois a perda nas arestas acontece devido, principalmente, a concentração de tensões nas regiões externas e nas arestas dos corpos de prova.

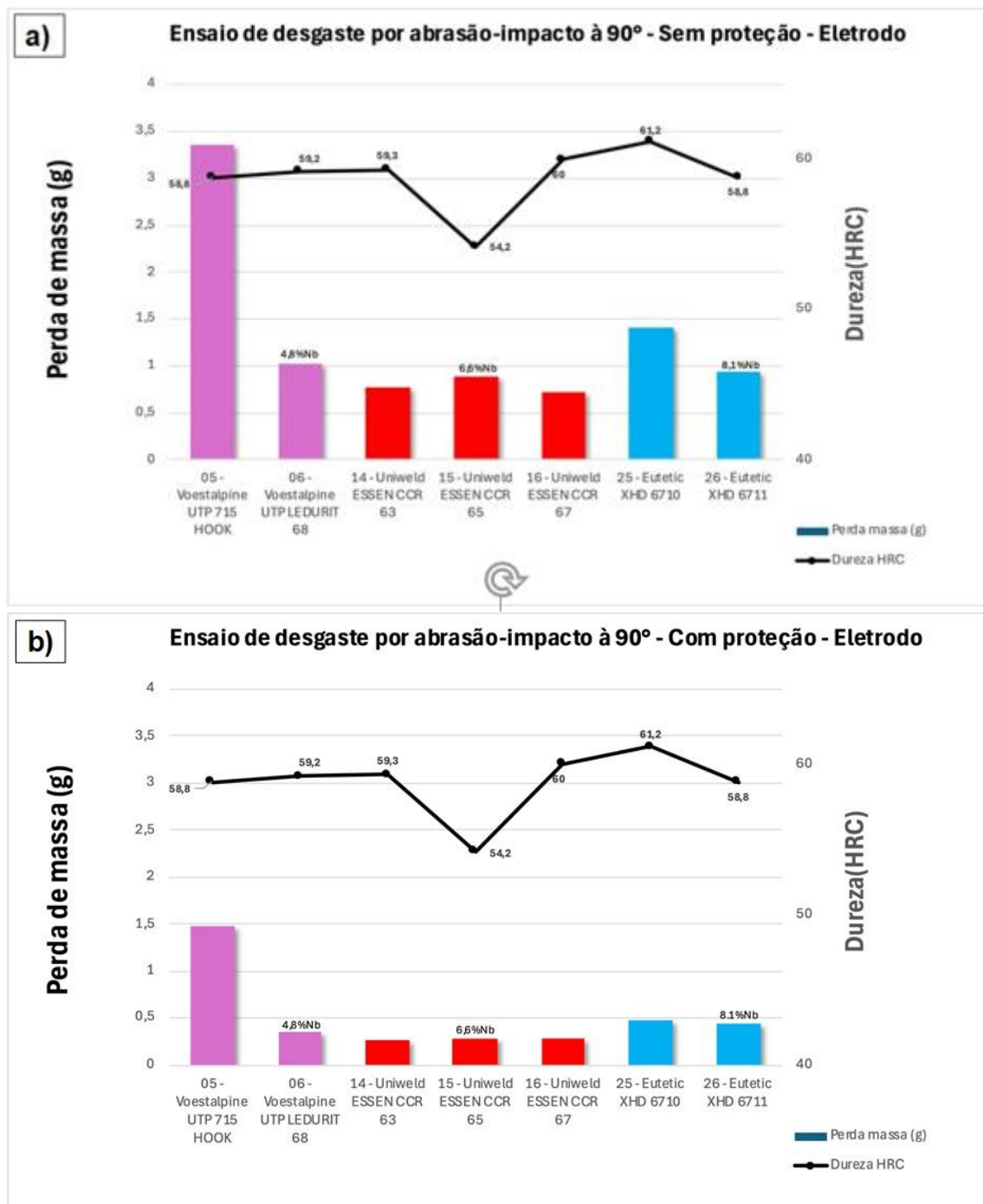
Para complementar a análise dos resultados dos ensaios de abrasão-impacto a 90°, foram incluídos gráficos contendo os valores médios de perda obtidos para alguns fornecedores. As Figs. 4 e 5, mostram a separação por cores, representando diferentes fornecedores, e com a inserção dos valores de dureza (curva em preto), presença ou não de Nb, e tipo de consumível utilizado. Essa abordagem amplia a compreensão dos dados e facilita a interpretação dos resultados

Fig. 4 - Resultados comparativos do ensaio de desgaste por abrasão-impacto à 90°, consumível arame:
a) sem proteção e b) com proteção.



Fonte: (Cannizza et al., 2025).

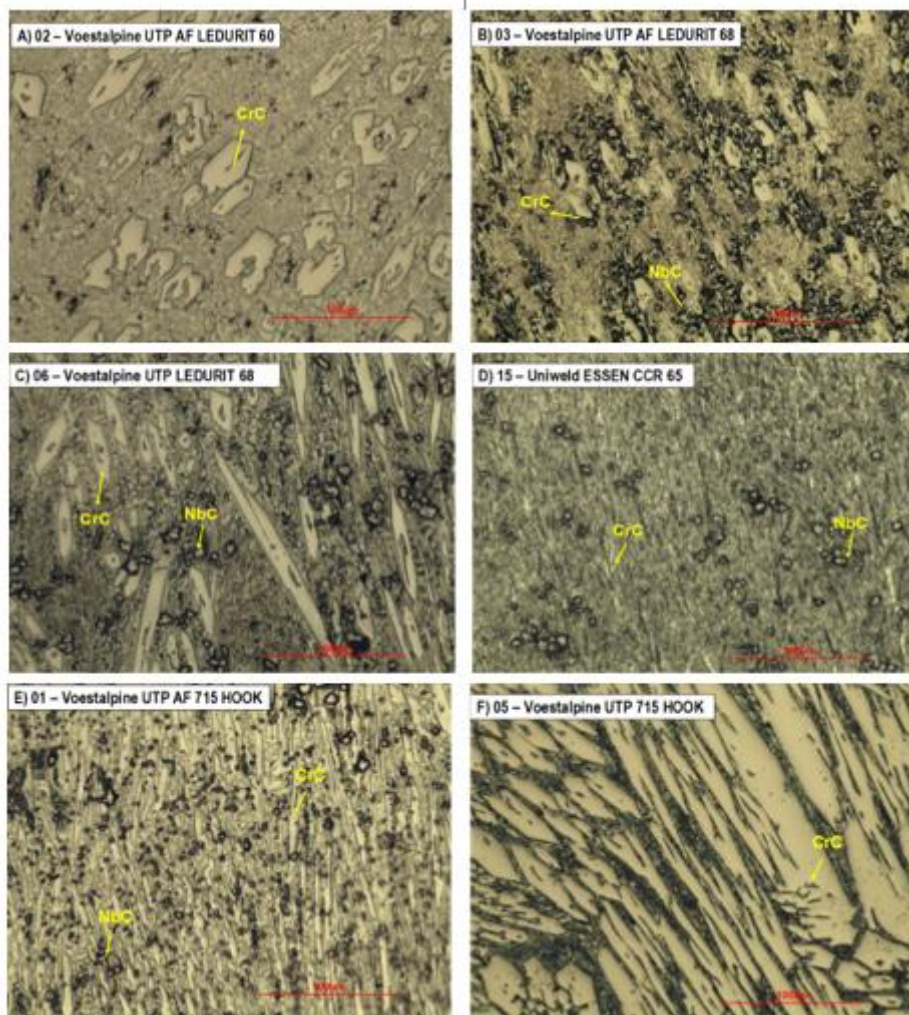
Fig. 5 - Resultados comparativos do ensaio de desgaste por abrasão-impacto à 90°, consumível eletrodo: a) sem proteção e b) com proteção.



Fonte: (Cannizza et al., 2025).

Foram selecionados três grupos de metalografias para buscar associar, de maneira comparativa, as microestruturas com o desempenho. A Fig. 6 mostra 6 (seis) metalografias selecionadas, como exemplo de microestruturas encontradas.

Fig. 6 – Grupos escolhidos para análise comparativa entre consumíveis.



Fonte: (Os Autores, 2025).

Todas as amostras apresentam matriz eutética com dispersão de carbonetos, tanto de Cr quanto de Nb, cujas morfologias podem ser alteradas pela presença de outros elementos de liga.

Observa-se que a relação de proporcionalidade, frequentemente considerada, do aumento da resistência ao desgaste com o aumento da dureza, conforme esperado, não se sustenta para todos os casos. Por exemplo, ao comparar as durezas do revestimento 13 (54,5 HRc) com aquele do revestimento 25 (61,2HRc) e as perdas de massa nos ensaios de abrasão-impacto, respectivamente, 0,2 gramas e 0,5 gramas, observa-se que a dureza mais elevada, por si só, não garante o melhor desempenho dos revestimentos submetidos a fenômenos tribológicos. A microestrutura e os tipos de elementos de liga, porcentagem dos mesmos, além da morfologia e distribuição dos carbonetos na matriz é o que apresenta a maior influência sobre a resistência ao desgaste. Foi possível observar que a presença do elemento nióbio, de uma maneira geral, diminui a perda de massa, talvez por gerar carbonetos menores e mais bem distribuídos na matriz, fato que melhora a tenacidade.

4. Considerações finais

A proteção de borda mostrou eficácia ao reduzir o desgaste nos ensaios de abrasão-impacto, contribuindo para a obtenção dos dados tanto qualitativa quanto quantitativamente.

A relação entre dureza e resistência ao desgaste não foi diretamente proporcional em todos os casos, destacando a necessidade de considerar outros fatores, como composição química e microestrutura. Elementos de liga como Nb, W, Ti e V desempenharam papel crucial no refinamento microestrutural e na melhoria da resistência ao desgaste abrasão-impacto.

O estudo gerou um banco de dados útil para permitir, quando necessário, o ranqueamento de consumíveis de solda e utilizar, ainda que com alguns senões, os mais adequados às condições operacionais específicas, como aquelas encontradas em moendas de usinas sucroenergéticas.

Esse estudo representou um avanço no conhecimento sobre o comportamento de revestimentos obtidos com consumíveis de solda, uma vez que impactos repetitivos são fenômenos tribológicos comuns na indústria, como, por exemplo, ocorre em componentes de moendas de usinas sucroenergéticas. Com os resultados obtidos aumenta-se o número de informações, que facilitam a escolha dos consumíveis de solda para aplicações específicas de revestimentos, pois os fenômenos tribológicos são mais, ou menos, agressivos dependendo do ambiente em que acontece a operação.

Referências

- [1] WOYDT, M. Material efficiency through wear protection – The contribution of Tribology for reducing CO2 emissions. **Wear**, p.488-489, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204134>.
- [2] PENAGOS, J.; VIÁFARA, C.; CHAVES, R. Ensaios de desgaste de chapas de revestimento de chutes de transferência. **Instituto Tecnológico Vale, PROD. TEC. ITV. MI-N006/2021**. <https://doi.org/10.29223/PROD.TEC.ITV.MI.2021.6.Penagos>.
- [3] BHANSALI, K. MILLER, A.E. Resistance of pure metals to low stress abrasive wear. **Wear**, v.71, n.3, p. 375-379, 1981.
- [4] GUO, Z. et al. Effects of heat-treatment on the microstructure and wear resistance of high-chromium cast iron for rolls. **Advances in Materials Science and Engineering**, v.2, p. 1-7, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/9807685>
- [5] QIAN, L. et al. Anomalous relationship between hardness and wear properties of a superelastic nickel–titanium alloy. **Appl. Phys. Lett.**, v.84, n.7, p. 1076–1078, 2004.
- [6] JFE STEEL CORPORATION. Everhard Abrasion Resistance Steel Plate. Disponível em: <https://www.jfe-steel.co.jp/en/products/plate/b05.html>. Acesso em: 9 de agosto de 2023.
- [7] ARCELOR M. Wear resistance steels. Disponível em: (<https://industeel.arcelormittal.com/product/wear-resistant-steels/>). Acesso em: 9 de agosto de 2023.
- [8] BALL, A. On the importance of work hardening in the design of wear-resistant materials. **Wear**, v. 91, p. 201-207, 1983.
- [9] WANG, W. et al. Multiphase steel with improved impact-abrasive wear resistance in comparison with conventional Hadfield steel. **Materials & Design**, v. 105, p. 96-105, 2016.
- [10] GAHR, K.H.Z.; DOANE, V.D. Optimizing fracture toughness and abrasion resistance in white cast irons. **Metallurgical Transactions A**, v. 11, p. 613-620, 1980.
- [11] ANTONOV, M.; VEINTHAL, R.; YUNG, D. L.; KATUSIN, D.; HUSSAINOVA, I. Mapping of impact-abrasive wear performance of WC–Co cemented carbides. **Wear**, v. 332–333, p. 971-978, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.031>.
- [12] VALTONEN, K.; RATIA, V.; OJALA, N.; KUOKKALA, V.-T. Comparison of laboratory wear test results with the in-service performance of cutting edges of loader buckets. **Wear**, v. 388, p. 93-100, 2017
- [13] CHINTHA, A. R.; VALTONEN, K.; KUOKKALA, V.-T.; KUNDU, S.; PEET, M. J.; BHADSHIA, H. K. D. H. Role of fracture toughness in impact-abrasion wear. **Wear**, v.428-429, p. 430-437, 2019.