

ESTUDO DAS PROPRIEDADES DE REVESTIMENTOS DUROS PRODUZIDOS COM ADIÇÃO DE PÓ DE NIÓBIO AO FLUXO NEUTRO NO PROCESSO DE SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO

STUDY OF THE PROPERTIES OF HARDFACING PRODUCED WITH THE ADDITION OF NIOBIUM POWDER TO THE NEUTRAL FLUX IN THE SUBMERGED ARC WELDING PROCESS

Alessandro Fraga Farah [I]
Andrei Henrique Gonçalves [II]
Solange Pereira dos Santos Farah [III]
Márcia Aparecida Gomes [IV]
Edson Luis Boldrin [V]

Área: A4. Gestão de Sistemas Mecânicos e Industriais (GESMI)
Subárea: S7: Metalurgia e Processos de Soldagem

RESUMO

Nas indústrias, um dos fatores que afetam a produção é o desgaste contínuo de equipamentos devido à alta abrasividade de alguns produtos, tendo assim empecilhos nas demandas. O método utilizado para a restauração de componentes e máquinas, muitas das vezes efetuada pela Soldagem de Arco Submerso (SAW), é o da solda de revestimento, o que agrega mais vida útil aos equipamentos e componentes industriais. Este processo de soldagem é uma ótima opção para ser utilizada devido ao fluxo que protege a solda da atmosfera e as altas taxas de deposição, além do controle das propriedades mecânicas do revestimento obtido. O Nióbio, que atualmente está sendo utilizado comercialmente, tornou-se um potencial aditivo a está solda e sendo assim, um possível substituto a outros elementos utilizados no processo. Neste estudo foi verificada a influência da adição de Nióbio na forma de pó metálico, adicionado ao fluxo neutro, no processo de soldagem por arco submerso, para revestimentos duros. Os resultados obtidos no processo foram avaliados e mostraram grande potencial nas aplicações que requerem altas taxas de durabilidade desse tipo de material, baseado nas propriedades de dureza e resistência ao desgaste que foram estudadas.

Palavras-chave: Nióbio. Revestimento duro. Desgaste. Dureza. Microestrutura.

ABSTRACT

In industries, one of the factors that affect production is the continuous wear and tear of equipment due to the high abrasiveness of some products, thus hampering demand. The

[I] Prof. Dr. da Faculdade de Tecnologia Deputado Waldyr Alceu Trigo de Sertãozinho (Fatec-Stz) – São Paulo – Brasil. alessandro.farah@fatec.sp.gov.br
[II] Tecnólogo em Mecânica: Processos de Soldagem da Faculdade de Tecnologia Deputado Waldyr Alceu Trigo de Sertãozinho (Fatec-Stz) – São Paulo – Brasil. andreihg2010@gmail.com
[III] Prof. Me. da Faculdade de Tecnologia Deputado Waldyr Alceu Trigo de Sertãozinho (Fatec-Stz) – São Paulo – Brasil. solange.farah@fatec.sp.gov.br
[IV] Auxiliar Docente Ms. da Faculdade de Tecnologia Deputado Waldyr Alceu Trigo de Sertãozinho (Fatec-Stz) – São Paulo – Brasil. E-mail: marcia.gomes@fatec.sp.gov.br
[V] Tecnólogo em Mecânica: Processos de Soldagem. Auxiliar Docente da Faculdade de Tecnologia Deputado Waldyr Alceu Trigo de Sertãozinho (Fatec-Stz) – São Paulo – Brasil. E-mail: edson.boldrin@fatec.sp.gov.br



method used for the restoration of components and machines, often carried out by Submerged Arc Welding (SAW), is that of overlay welding, which adds more useful life to equipment and industrial components. This welding process is a great option to be used due to the flux that protects the weld from the atmosphere and the high deposition rates, in addition to the control of the mechanical properties of the obtained coating. Niobium, which is currently being used commercially, has become a potential additive to this weld and, therefore, a possible substitute for other elements used in the process. In this study, the influence of the addition of Niobium in the form of metallic powder, added to the neutral flux, in the submerged arc welding process for hard coatings was verified. The results obtained in the process were evaluated and showed great potential in applications that require high durability rates for this type of material, based on the hardness and wear resistance properties that were studied.

Keywords: Niobium. Hardfacing. Wear. Microhardness. Microstructure.

Data de submissão do artigo: 15/07/2023.
Data de aprovação do artigo: 25/10/2023.
DOI: 10.33635/sitefa.v1i1.267

1 INTRODUÇÃO

Nas indústrias, um dos fatores que afetam o orçamento é o desgaste contínuo de equipamentos devido à alta abrasividade de alguns produtos, consequentemente provocando paradas não programadas para manutenção, o que afetam diretamente a produção. Uma das técnicas de restauração desses componentes é feito por soldagem utilizando a técnica de arco submerso, com aplicação de revestimentos duros. A soldagem por arco submerso (*Submerged Arc Welding - SAW*), é um procedimento em que um arco elétrico produz o calor necessário para fundir o metal e esse arco é protegido por um fluxo. Novas alternativas de soldagem de revestimento duros e resistentes ao desgaste, tem sido constantemente estudadas. O Nióbio possui excelente capacidade de formação de carbonetos devido a sua alta afinidade com o Carbono, tornando-se um material muito estudado para este fim.

Este estudo tem como objetivo avaliar a influência da adição de Nióbio na forma de pó metálico, adicionado ao fluxo neutro, no processo de soldagem por arco submerso, para revestimentos duros. As propriedades de dureza, microdureza, metalografia e resistência ao desgaste foram avaliadas e os resultados encontrados, mostraram grande potencial nas aplicações que requerem altas taxas de resistência ao desgaste abrasivo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse tópico será mostrada a literatura consultada para a concepção do referencial teórico do trabalho.

2.1 Nióbio (Nb)

Segundo Souza, Fernandes e Guerra (2013), o Nb é um sólido metálico, dúctil e macio, tendo um ponto de fusão elevada e de grande resistência a corrosão.

O Nióbio atualmente já se encontra em aplicações na indústria automobilística, naval, entre outras; isso se deve à sua capacidade de aumentar a dureza e resistência de aços, com pequenas adições.



Segundo Bruziquesi *et al.* (2019), o Nb também é usado para produzir ligas que suportam altas temperaturas e ambientes corrosivos, além da facilidade de formar carbonetos duros.

2.2 Aço SAE 1020

O aço SAE 1020 é classificado como um aço de baixo teor de carbono, e de boa viabilidade econômica em relação a outros tipos de aços, além de fácil soldabilidade e conformabilidade. A maior parte de peças e componentes utilizados em situações que requerem resistência ao desgaste abrasivo são fabricadas com aços SAE 1020, devido ao seu baixo custo, e são revestidas com ligas resistentes à abrasão, para aumentarem a sua vida útil.

2.3 Aplicação de revestimento duro

De acordo com Souza (2015), esta aplicação tem como intuito a diminuição dos gastos com manutenção graças a sua resistência ao desgaste.

Segundo Fantoni (2022), este revestimento duro pode ser feito pelo método de soldagem SAW, já que tem elevada quantidade de calor e baixo índice de penetração de solda, além de altas taxas de deposição que aumentam a produtividade.

Segundo Lima e Ferrasi (2009), a indústria sucroalcooleira apresenta uma expansão considerável e necessidade maior de produção, tendo como obstáculo as paradas para manutenção, que podem ser evitados com o uso do revestimento duro.

2.4 Arco Submerso (SAW)

Segundo Schaeffer (2017) a soldagem por arco submerso é de grande uso nas indústrias, o mesmo que normalmente utiliza arame (diâmetro acima de 1,6 milímetros) como material de adição. No caso das aplicações de revestimento este processo utiliza fitas como material de adição e maiores correntes elétricas.

Segundo Modenesi, Marques e Bracarense (2005), a soldagem a arco submerso, é um processo em que a união por fusão entre metais é obtida através de um arco elétrico estabelecido entre a ponta do eletrodo e o metal base.

Na soldagem a arco submerso, o arco e o metal fundido são protegidos por uma manta de fluxo granular durante o processo (MODENESI; MARQUES; e BRACARENSE, 2005). O arco é mantido em uma cavidade de fluxo fundido ou escória que refina o metal de solda e, também, o protege de contaminação atmosférica. As propriedades mecânicas, químicas e outras qualidades do depósito de solda final podem ser controlada pelo fluxo.

Segundo Osório *et al.* (2016), elementos de liga estão sendo misturado com o fluxo para melhorar algumas propriedades do depósito de solda. A forte influência do fluxo na finalidade do projeto de solda e propriedades mecânicas da peça é evidente.

2.5 Ensaio de Dureza Rockwell

Segundo Souza (1982) o ensaio de dureza Rockwell (HR) diminui o tempo gasto na leitura da impressão, já que a mesma pode ser efetuada diretamente na máquina (durômetro), e com menos chances de erro.

O método Rockwell é indicado para uso em linhas de produção, laboratórios e validações de tratamento térmicos. O ensaio é baseado na penetração de uma ponta, sendo



elas do tipo esférico (esfera de aço) ou cônico (cone de diamante); primeiramente aplicando uma pressão menor para fixar o corpo e posteriormente aplicando uma carga maior e retirando a mesma para a leitura de dureza; a leitura depende do tipo de ponta e da carga utilizada durante o processo.

2.6 Ensaio de desgaste (abrasômetro roda de borracha)

De acordo Marques et al. (2016), para efetuar o ensaio de abrasão é necessário realizar a limpeza do corpo de prova e executar a pesagem.

O ensaio é realizado fixando o corpo de prova e adicionando peso e areia seca. O abrasivo entra em contato com o corpo de prova junto com a fricção da roda de borracha, desgastando a superfície (ASTM G-65, 2016).

2.7 Ensaio de Microdureza Vickers

De acordo com Souza (1982) existem dois tipos de penetradores para a microdureza, são eles Vickers (pirâmide de diamante com base quadrada) e Knoop (forma de pirâmide alongada). O ensaio estudado ocorre utilizando o penetrador com a base quadrada e o microscópio acoplado ao mesmo para a medição exata da estampagem na superfície, seguindo da carga aplicada e aguardando em torno de 18 segundos; efetuada a estampa na face do corpo é analisada suas medidas, assim, obtendo a dureza da peça.

2.8 Análise Metalográfica

As análises metalográficas dos revestimentos foram feitas de acordo com a norma ASTM E3 (ASTM E3, 2011).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Nesse tópico serão descritos os materiais, procedimentos e ensaios efetuados para a realização do trabalho.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados neste trabalho foram amostras de aço SAE 1020, revestidas pelo processo a Arco Submerso com adição de pó metálico ao fluxo e utilizando um arame neutro.

Cada amostra foi composta de uma mistura do fluxo comercial neutro com um pó metálico. Os percentuais de fluxo e de pós, variaram de acordo com cada liga produzida. Os pós-metálicos utilizados foram FeNbC (doado pela Empresa CBMM), FeMn-AC (AC = alto carbono) e Grafite (doados pela Empresa Durun do Brasil).

As características dos pós metálicos FeNbC, FeMn-AC e Grafite foram fornecidas pelas empresas parceiras conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Características dos pós fornecidos pelas empresas.

Pó Metálico	Composição Química (%)	Granulometria (mesh)
FeNbC *	NbC (45-57); Fe (35-45); Al (2-8)	50-100
FeMn-AC **	Mn (77); C (6); Fe (15); Si (2)	200-400
Grafite **	C (100)	400

Fonte: * CBMM e ** DURUM do Brasil



3.2 Ligas Produzidas

Foram feitas 05 variações de composições de fluxo com os pós-metálicos (Ligas 1, 2, 3, 4 e 5). As misturas foram pesadas em balança digital com precisão de 4 casas decimais. Para cada liga foi utilizado um total de 1kg de componentes (Fluxo Neutro+Pó metálico). Esses componentes foram misturados e colocados no recipiente de fluxo da máquina de soldagem a arco submerso. Os procedimentos foram iguais para todos os revestimentos.

3.3 Ensaio de Dureza

Para as análises de dureza, foi utilizado um durômetro analógico tipo Rockwell, escala C. Foram efetuadas cinco medidas para cada corpo de prova.

3.4 Ensaio de Desgaste

Os ensaios de desgaste, foram feitos em abrasômetro tipo roda de borracha, segundo a norma ASTM G65, procedimento A. O equipamento que consiste no contato direto da roda citada ao corpo de prova junto a adição de areia para causar fricção. A amostra é pesada antes e depois do ensaio. O resultado é medido em relação à sua perda de massa.

3.5 Análise Metalográfica

Para a análise metalográfica, cada amostra foi lixada, polida e atacada. O ataque químico foi o Nital 2%. O registro das microestruturas foi feito com um microscópio ótico.

3.6 Ensaio de Microdureza

Para as medições, foi utilizado um durômetro digital tipo Vickers, com carga de 9,8N.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados os resultados obtidos e suas respectivas discussões.

4.1 Ligas Produzidas

As ligas desenvolvidas e ensaiadas estão na Tabela 2. A tabela mostra o percentual em peso dos componentes utilizados em cada liga.

Tabela 2 - Percentual dos componentes das ligas desenvolvidas

	Percentual da Liga (%)			
Material	Fluxo Neutro	FeNbC	Grafite	FeMn-AC
Liga 1	86,21	13,79	0,00	0,00
Liga 2	81,97	13,11	0,00	4,92
Liga 3	60,00	40,00	0,00	0,00
Liga 4	70,00	30,00	0,00	0,00
Liga 5	66,67	31,67	1,67	0,00

Fonte: os autores (2023)

Após depositada cada mistura de componentes (Fluxo+Arame+Pó Metálico), os revestimentos obtidos foram analisados quanto a sua composição química final. A Tabela 3 mostra a composição química, obtida por espectrometria de emissão ótica de cada amostra.



Tabela 3 - Composição química das ligas desenvolvidas

Material	C	Si	Mn	P	S	Nb	Fe
Liga 1	0,72	1,03	1,92	0,05	0,02	6,17	Bal.
Liga 2	0,79	1,36	3,88	0,09	0,02	6,12	Bal.
Liga 3	0,83	0,87	1,20	0,08	0,42	>11,14	Bal.
Liga 4	0,65	1,22	1,41	0,14	0,42	>11,14	Bal.
Liga 5	2,38	0,93	1,64	0,06	0,03	>11,14	Bal.

Fonte: os autores (2023)

Os valores de carbono, manganês e nióbio encontrados, estão presentes na composição do pó FeNbC, FeMn-AC e Grafite (Tabela 1).

A Liga 5 apresentou o maior percentual de carbono devido a adição do Grafite. Nota-se também um aumento do teor de manganês na Liga 2 devido ao pó FeMn-AC.

As Ligas 3, 4 e 5 não tiveram um valor exato de nióbio devido ao espectrômetro identificar percentuais até 11,14%. Entretanto, comparando-se às Ligas 1 e 2, o teor de nióbio pode ter ficado dentro do especificado.

4.2 Ensaio de Dureza

A Tabela 4 mostra as durezas encontradas e a média obtida entre elas.

Tabela 4 - Resultados do ensaio de dureza

	Dureza (HRc)						
Material	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média	Desvio Padrão
Liga 1	33,5	30,0	31,0	30,5	32,5	31,5	1,31
Liga 2	47,0	48,5	38,0	38,0	48,0	43,9	4,84
Liga 3	31,0	27,0	32,0	28,0	30,0	29,6	1,85
Liga 4	36,5	36,0	36,0	36,5	42,0	37,4	2,31
Liga 5	57,5	59,5	61,0	61,0	58,5	59,5	1,38

Fonte: os autores (2023)

Após a análise do ensaio de dureza percebeu-se que as ligas tiveram dureza proporcionais aos elementos adicionados pelos pós-metálicos, com destaque para a Liga 5. Normalmente a dureza está associada ao teor de carbono.

4.3 Ensaio de Desgaste

Para cada liga foram feitos 03 corpos de prova. As amostras ensaiadas apresentaram resultados conforme Tabela 5. A tabela mostra o valor médio dos resultados obtidos.

Tabela 5 – Resultados do ensaio de desgaste

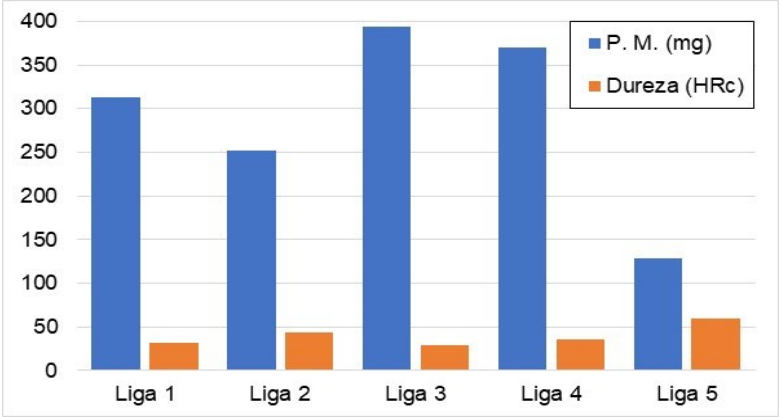
Material	Perda de Massa (mg)	Desvio Padrão (mg)
Liga 1	313,0	7,4
Liga 2	252,0	9,6
Liga 3	394,0	4,3
Liga 4	369,5	9,3
Liga 5	129,0	6,8

Fonte: os autores (2023)

Nota-se na tabela que a menor perda de massa ocorreu para a Liga 5 e a maior para a Liga 3. Esses resultados mostram que a regra básica de menor dureza maior desgaste e vice-versa, ficou evidenciada. E o mesmo ocorreu para as demais ligas.

Para uma melhor visualização da relação entre dureza e perda de massa foi feito um gráfico com os resultados dos dois ensaios. O Gráfico 1 mostra essa relação.

Gráfico 1 – Relação entre a perda de massa e a dureza

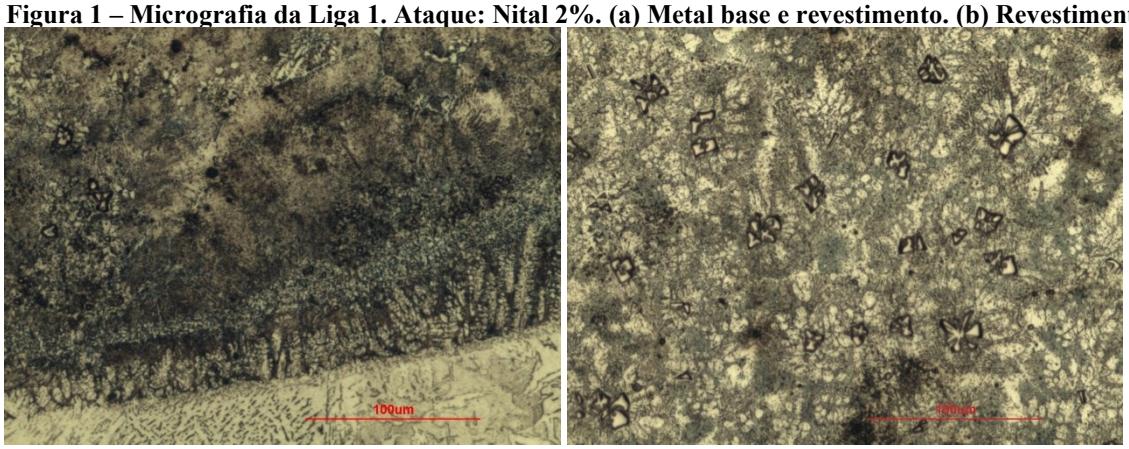


Fonte: os autores (2023)

4.4 Análise Metalográfica

Os resultados das análises metalográficas são mostrados a seguir. A Figura 1 (a) mostra a microestrutura da Liga 1 depositada sobre o aço SAE 1020 (região mais clara). Nota-se uma distribuição heterogênea de carbonetos e grãos colunares próximo ao MB. A Figura 1 (b) mostra com detalhes os carbonetos de Nióbio primários (claros brilhantes e com contornos escuros), distribuídos mais uniformemente numa matriz eutética de austenita e FeNbC (mistura das fases mais claras com as cinzas).

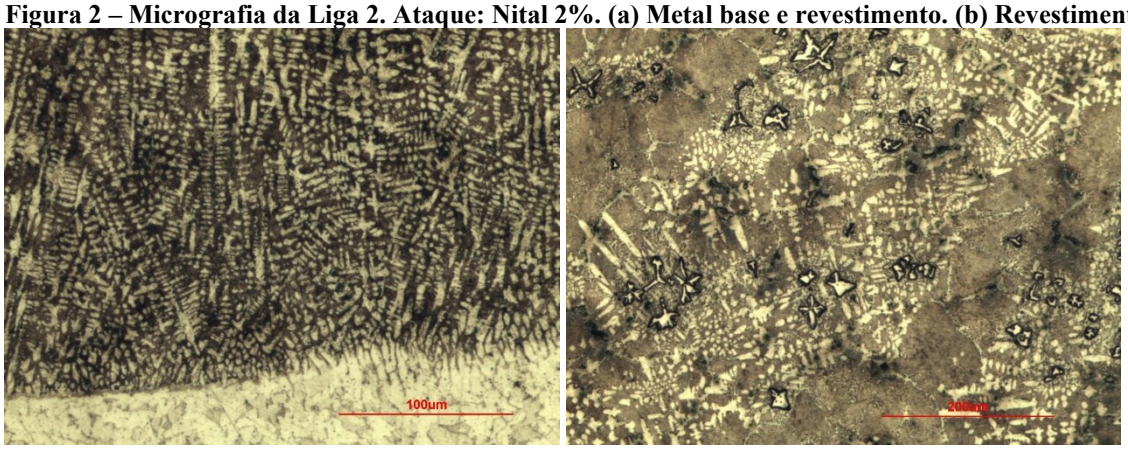
Figura 1 – Micrografia da Liga 1. Ataque: Nital 2%. (a) Metal base e revestimento. (b) Revestimento.



Fonte: os autores (2023)

A Figura 2 (a) mostra a microestrutura da Liga 2 depositada sobre o aço SAE 1020 (região mais clara). Nota-se grãos colunares próximo ao MB e um eutético austenita e FeNbC, além de pequenos carbonetos primários de Nb. A Figura 2 (b) mostra com detalhes os carbonetos de Nióbio primários (claros brilhantes e com contornos escuros), distribuídos não uniformemente numa matriz eutética de martensita e FeNbC (fases mais claras) .

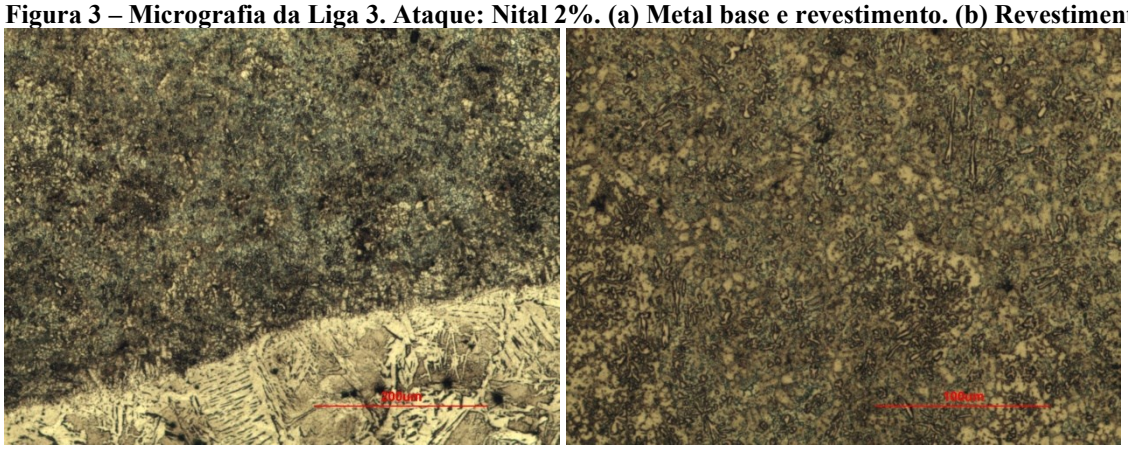
Figura 2 – Micrografia da Liga 2. Ataque: Nital 2%. (a) Metal base e revestimento. (b) Revestimento.



Fonte: os autores (2023)

A Figura 3 (a) mostra a microestrutura da Liga 3 depositada sobre o aço SAE 1020 (região mais clara). Não há grãos colunares próximo ao MB e o revestimento está mais homogêneo com pequenos carbonetos primários de Nb. A Figura 3 (b) mostra com detalhes os carbonetos de Nióbio primários (claros brilhantes e com contornos escuros), distribuídos mais uniformemente numa matriz contínua de austenita e áreas de FeNbC (fases mais claras).

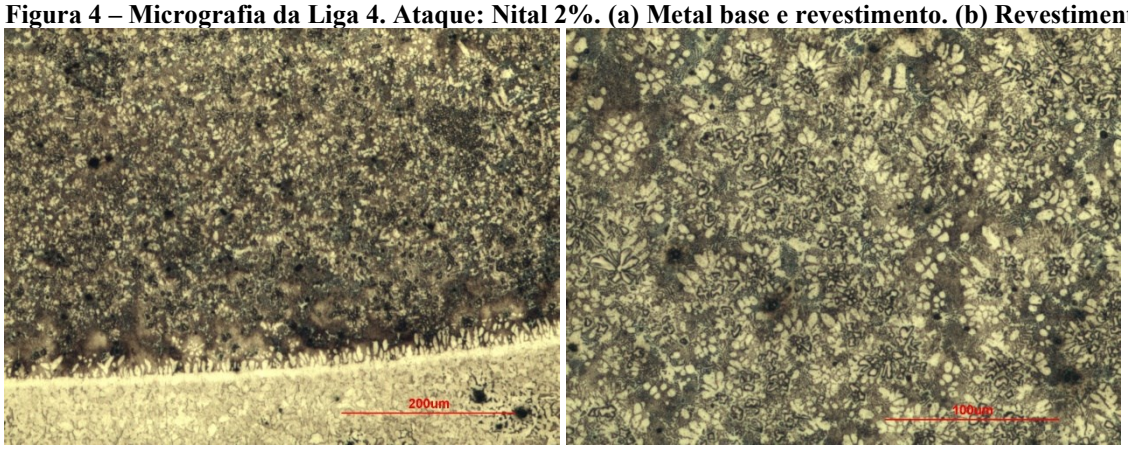
Figura 3 – Micrografia da Liga 3. Ataque: Nital 2%. (a) Metal base e revestimento. (b) Revestimento



Fonte: os autores (2023)

A Figura 4 (a) mostra a microestrutura da Liga 4 depositada sobre o aço SAE 1020 (região mais clara). Nota-se uma distribuição heterogênea de carbonetos e grãos colunares próximo ao MB. A Figura 4 (b) mostra com detalhes os carbonetos de Nb primários (claros brilhantes e com contornos escuros), distribuídos uniformemente numa matriz eutética de austenita e FeNbC (mistura das fases mais claras com as cinzas).

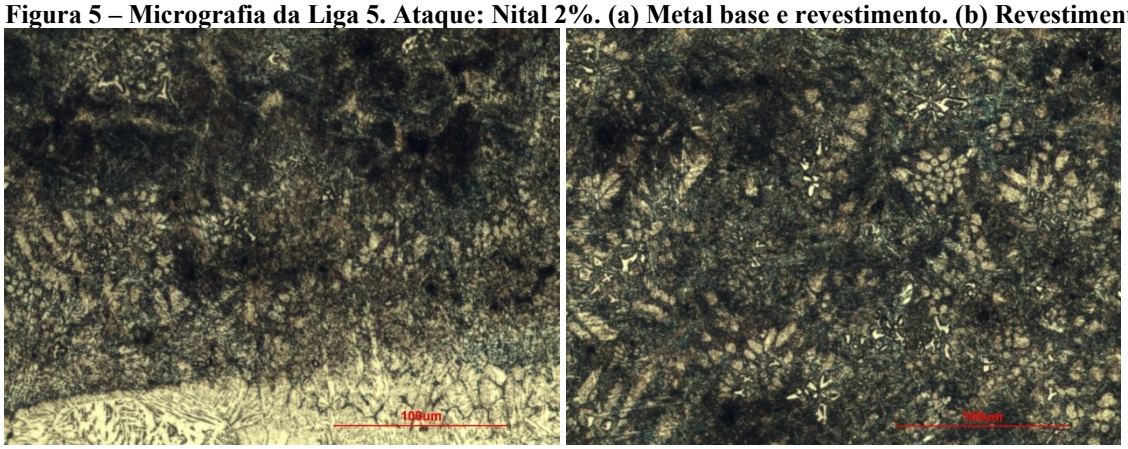
Figura 4 – Micrografia da Liga 4. Ataque: Nital 2%. (a) Metal base e revestimento. (b) Revestimento



Fonte: os autores (2023)

A Figura 5 (a) mostra a microestrutura da Liga 5 depositada sobre o aço SAE 1020 (região mais clara). Não há grãos colunares próximo ao MB e o revestimento está mais heterogêneo com pequenos carbonetos primários de Nb e fases escuras e claras. A Figura 5 (b) mostra com detalhes poucos carbonetos de Nióbio primários (claros brilhantes e com contornos escuros), distribuídos não uniformemente numa matriz contínua de martensita e áreas de eutético de martensita e FeNbC (fases mais claras).

Figura 5 – Micrografia da Liga 5. Ataque: Nital 2%. (a) Metal base e revestimento. (b) Revestimento



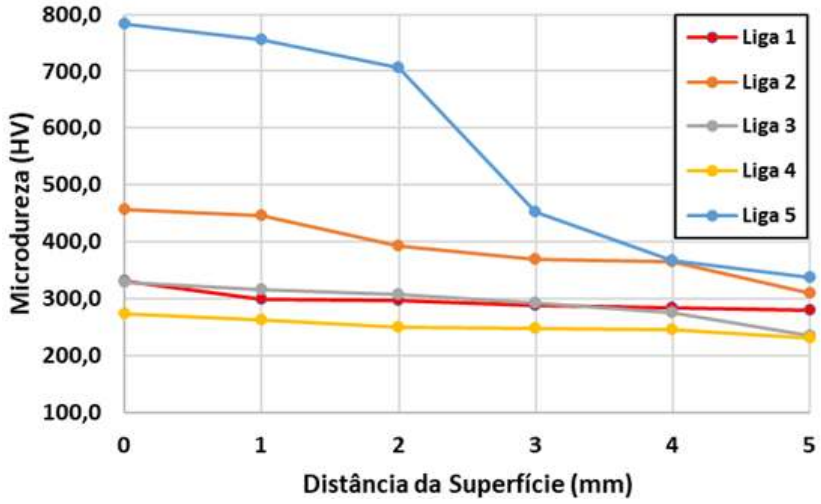
Fonte: os autores (2023)

4.5 Ensaio de Microdureza

Os ensaios de microdureza foram feitos desde a superfície até a interface entre revestimento e o metal base.

O gráfico 2 mostra o perfil de microdureza feito nas Ligas 1, 2, 3, 4 e 5. O ponto 0 (zero) é bem próximo à superfície e o ponto 5 (cinco) é na interface revestimento/metal base.

Gráfico 2 – Resultados do ensaio de microdureza



Fonte: os autores (2023)

Nota-se que as Ligas 1, 3 e 4 apresentaram uma pequena variação de dureza ao longo da seção do revestimento e durezas muito próximas entre elas.

Na Liga 2, a dureza variou um pouco mais, mas foi superior às Ligas 1, 3 e 4.

A Liga 5 teve a maior variação de dureza ao longo da seção do revestimento, mas foi bastante superior às demais, só aproximando quando estava bem próxima à interface revestimento/metal base.

A variação de dureza ao longo da seção do revestimento se dá devido à diluição do revestimento com o metal base.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados encontrados verificou-se que a adição de Nióbio apresentou durezas menores nas ligas 1 a 4, porém, a liga 5 apresentou alta dureza devido a adição de grafite junto ao pó.

Os resultados de desgaste mostraram a relação direta entre dureza e resistência ao desgaste.

A análise metalográfica mostrou a formação dos diferentes tipos de carbonetos de Nióbio, com a variação do percentual de FeNbC adicionado.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E3-11**. Standard Guide for Preparation of Metallografic Specimens. ASTM International, USA, Dec. 2011. Disponível em: https://www.astm.org/e0003-11r17.html. Acesso em: 02 mar. 2023.

_____. **ASTM G65-16**, Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. Disponível em: https://www.astm.org/catalogsearch/result/?q=ASTM+G65-16. Acesso em: 02 mar. 2023.



BRUZIQUESI, C. G. O.; BALENA, J. G.; PEREIRA, M.C.; SILVA, A. C.; OLIVEIRA, L. C. A. Nióbio: um elemento químico estratégico para o brasil, **Revista Química Nova** v. 42, n. 10 outubro 2019.

FANTONI, Luiz Felipe. **Estudo da soldagem SAW com tecimento transversal visando aplicações de revestimento**, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville - Engenharia Naval, 2022.

LIMA, A. C.; FERRARESI, V. T. Análise da microestrutura e da resistência ao desgaste de revestimento duro utilizado pela indústria sucroalcooleira, **Revista Soldagem Inspeção**. São Paulo, Vol. 14, No. 2, p.140-150, abril/junho 2009.

MARQUES, F. M.; COSTA, R. C.; GALINDRO, G. N.; ROCHA, A. S. Análise de desgaste abrasivo do revestimento duro a base de carbonetos de cromo depositado por SMAW. **Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica**. v. 20, n. 2, pp. 13-23, 2016.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem:** fundamentos e tecnologia (vol. 3). Belo Horizonte: UFMG, 2005.

OSÓRIO, A. G.; FERNANDES, K. B.; SALOMÃO, L.; MUMBACH, E.; ARAÚJO, D.; SOUZA, D. Estudo da transferência de elementos químicos do fluxo para o metal fundido na soldagem a arco submerso. **Revista Matéria**, 510-524, 2016.

SCHAEFFER, Claudio Marques. **Adequação do procedimento de soldagem por arco submerso para o revestimento com arame iconel 625.** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2017.

SOUZA, R. M. F., FERNANDES, L.U., GUERRA, W. Nióbio, **Revista Química Nova na Escola**, v. 35, n. 1, p. 68-69, fevereiro 2013.

SOUZA, Daniel Dominices Baía Gomes de. **Aplicação de revestimento duro utilizando o processo fcaw duplo arame para diferentes tipos de consumíveis.** Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015. DOI https://doi.org/10.14393/ufu.di.2015.341.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaios Mecânicos De Materiais Metálicos. Fundamentos Teóricos E Práticos**. São Paulo, editora Edgard Blücher, Edição 5, Cap. 4, pag. 103 – 136, 1982.