

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

FACULDADE DE ENGENHARIA – FAEN

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CONSTRUÇÃO DE REVESTIMENTOS MODIFICADORES DE SUPERFÍCIE POR
PROCESSO DE SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO COM ELETRODO REVESTIDO (SMAW)

PÂMELA BRANDÃO BERNAL

RODRIGO JOSIEL DA SILVA

DOURADOS - MS

2025

PÂMELA BRANDÃO BERNAL
RODRIGO JOSIEL DA SILVA

CONSTRUÇÃO DE REVESTIMENTOS MODIFICADORES DE SUPERFÍCIE POR
PROCESSO DE SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO COM ELETRODO REVESTIDO (SMAW)

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Edilson Nunes Pollnow
Área de concentração: 3.03.03.04-4

DOURADOS - MS

2025



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

ANEXO D - AVALIAÇÃO FINAL DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aluno: **RODRIGO JOSIEL DA SILVA E PAMELA BRANDÃO BERNAL**

Título do trabalho e subtítulo (se houver): **CONSTRUÇÃO DE REVESTIMENTOS MODIFICADORES DE SUPERFÍCIE POR PROCESSO DE SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO COM ELETRODO REVESTIDO (SMAW).**

BANCA EXAMINADORA

1. Presidente (orientador):

Prof. Dr. Edilson Nunes Pollnow, Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD

2. Membro:


Prof. Dr. Bruno Arantes Moreira, Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD

3. Membro:


Prof. Dr. Rafael Henrique Avanço, Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD

De acordo com o grau final obtido pelo aluno, nós da banca examinadora, declaramos **Aprovados** (Aprovado/Reprovado) os (as) alunos (as) acima identificado, na componente curricular Trabalho de Conclusão de Curso (TCC-II) de Graduação no Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Grande Dourados.


Dourados, 09 de dezembro de 2025.

Documento assinado digitalmente
 **EDILSON NUNES POLLNOW**
Data: 09/12/2025 21:34:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Edilson Nunes Pollnow

Documento assinado digitalmente
 **BRUNO ARANTES MOREIRA**
Data: 09/12/2025 21:58:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Bruno Arantes Moreira

Documento assinado digitalmente
 **RAFAEL HENRIQUE AVANÇO**
Data: 10/12/2025 00:04:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rafael Henrique Avanço

CONSTRUÇÃO DE REVESTIMENTOS MODIFICADORES DE SUPERFÍCIE POR PROCESSO DE SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO COM ELETRODO REVESTIDO (SMAW)

Pâmela Brandão Bernal

Rodrigo Josiel da Silva

Universidade Federal da Grande Dourados

pamela.bernal21@gmail.com

rdrgjosiel@gmail.com

Edilson Nunes Pollnow

edilsonpollnow@ufgd.edu.br

Universidade Federal da Grande Dourados

Resumo: Este trabalho investigou a modificação superficial do aço A36 por soldagem SMAW utilizando fluxos enriquecidos com boro e carbeto de ferro-nióbio(Fe-NbC) nas rotas seca e úmida, com foco na melhoria de propriedades relacionadas a microdureza. A metodologia envolveu inspeção visual, análise macroscópica para determinação da taxa de diluição, caracterização microestrutural da zona fundida, zona termicamente afetada e metal de base, além de ensaios de microdureza Vickers. Os resultados mostraram cordões íntegros e taxas de diluição com variações discretas, apresentando tendência de redução na taxa de diluição com boro e leve aumento na taxa de diluição com Fe-NbC, com maior estabilidade na soldagem a seco. As microestruturas revelaram que o Fe-NbC favoreceu a formação de colunas dendríticas e carbeto NbC, enquanto o boro promoveu carbeto B_4C e refinamento microestrutural, com aglomeração em concentrações elevadas. A microdureza apresentou variações moderadas, sendo o boro o agente mais eficaz no endurecimento, aproximando-se dos valores da amostra de referência. A ZTA manteve comportamento uniforme e o metal de base preservou sua microestrutura original. Concluiu-se que o boro se destacou como o elemento de maior impacto no desempenho final dos revestimentos, tanto pela redução da diluição quanto pelo aumento da dureza.

Palavras-chave: SMAW, Fluxo, Revestimento, Boro, Fe-NbC, Microscopia, Taxa de Diluição.

Abstract: This work investigated the surface modification of A36 steel by SMAW welding using fluxes enriched with boron and ferro-niobium carbide (Fe-NbC) in dry and wet routes, focusing on the improvement of properties related to microhardness. The methodology involved visual inspection, macroscopic analysis to determine the dilution rate, microstructural characterization of the fusion zone, heat-affected zone, and base metal, as well as Vickers microhardness tests. The results showed sound weld beads and dilution rates with discrete variations, presenting a tendency for dilution rate reduction with boron and a slight increase with Fe-NbC, with greater stability in dry welding. The microstructures revealed that Fe-NbC favored the formation of dendritic columns and NbC carbides, while boron promoted B_4C carbides and microstructural refinement, with agglomeration at higher concentrations. Microhardness showed moderate variations, with boron being the most effective agent in hardening, approaching the values of the reference sample. The HAZ maintained uniform behavior, and the base metal preserved its original microstructure. It was concluded that boron stood out as the element with the greatest impact on the final performance of the coatings, both by reducing dilution and increasing hardness.

Keywords: SMAW, Flux, Coating, Boron, Fe-NbC, Microscopy, Dilution Rate.

1. INTRODUÇÃO

Em ambientes industriais, paradas inesperadas na produção costumam estar ligadas ao desgaste acelerado de componentes, o que compromete a confiabilidade dos equipamentos e gera altos custos com manutenção corretiva e substituição de peças. Para enfrentar esse desafio, a engenharia de superfícies surge como uma estratégia essencial para aumentar a vida útil dos ativos. Ao modificar a camada externa dos materiais, é possível reduzir significativamente os efeitos da corrosão, abrasão e fadiga, melhorando a eficiência operacional e diminuindo falhas recorrentes (OLIVEIRA, 2012).

Entre as técnicas disponíveis para tratamento superficial, destacam-se processos como conversão química (fosfatização, anodização), eletrodeposição de metais (níquel, cromo), tratamentos térmicos e/ou termoquímicos superficiais (indução, cementação) e revestimentos orgânicos (pintura em pó, eletroforese). Essas soluções para problemas envolvendo corrosão, abrasão e fadiga são amplamente aplicadas em setores como automotivo, aeroespacial, metalmeccânico e construção civil. Além de aumentar a resistência ao desgaste e à corrosão, elas favorecem a aderência dos revestimentos, evitando deslocamentos e falhas prematuras, o que contribui para reduzir custos ao longo do ciclo de vida dos componentes (BEZERRA; SILVA FILHO; SILVA, 2024).

A aplicação de revestimento por soldagem mostra-se particularmente viável quando as condições de operação envolvem desgaste acentuado ou solicitações mecânicas severas, cenários em que processos convencionais de engenharia de superfícies tendem a apresentar vida útil limitada. A literatura destaca que o revestimento proporciona redução significativa de custos ao longo do ciclo de vida do equipamento, ao concentrar materiais de alto desempenho somente nas regiões críticas e evitar substituições frequentes de componentes (ASM INTERNATIONAL, 2004). Esse equilíbrio favorece sua adoção em peças de grande porte, equipamentos de alto valor agregado ou dispositivos cuja parada gera impacto produtivo relevante, justificando economicamente o uso do revestimento por soldagem em aplicações preventivas ou corretivas.

O revestimento por soldagem promove uma união metalúrgica entre o metal de base e o metal de adição, com diluição controlada, que impacta diretamente a qualidade da junta e o desempenho final. De acordo com Silva et al. (2022), esse controle é essencial para garantir propriedades adequadas e confiabilidade do componente.

Quando o nível de degradação compromete a geometria ou a funcionalidade da superfície, o revestimento por soldagem, também denominado “surfacing”, “hardfacing” ou “cladding”, constitui uma solução eficiente para restauração e aprimoramento de componentes. Essa técnica possibilita a aplicação de ligas metálicas de alto desempenho que possibilitam aumento de características como resistência, dureza, tenacidade e resistência à corrosão apenas na região superficial, preservando o núcleo com materiais mais econômicos, o que resulta em desempenho otimizado e redução de custos. Além disso, oferece a vantagem de realizar reparos diretamente no local de operação, sem a necessidade de substituição completa, garantindo maior flexibilidade e prolongando a vida útil dos equipamentos (PEIXOTO, 2012).

Entre os processos aplicáveis, a soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW) se destaca pela robustez, portabilidade e baixo custo, características que a tornam ideal para manutenção e fabricação em ambientes com recursos limitados (LIMA, 2019). Utilizando um eletrodo metálico revestido que gera o arco elétrico para fundir o metal de base, essa técnica oferece simplicidade, flexibilidade para operar em diversas posições e baixa sensibilidade a correntes de ar, permitindo aplicações em campo e locais de difícil acesso (COLAÇO, 2020).

No contexto industrial, uma estratégia promissora é modificar a superfície do componente durante o próprio processo de soldagem, por meio da adição controlada de elementos ativos ao fluxo. Essa técnica permite ajustar a composição química da poça de fusão e, consequentemente, influenciar a microestrutura e as propriedades finais do revestimento (SELOTO, 2016). Com isso, é possível obter superfícies com alta dureza e resistência ao desgaste, preservando a tenacidade do núcleo e garantindo equilíbrio entre desempenho e integridade estrutural (RECLA, 2016).

Entre os elementos ativos, segundo Liu et al. (2025) o boro se destaca pela capacidade de aumentar a dureza superficial, principalmente pela formação de carbeto B_4C , compostos intermetálicos de elevada dureza. Conforme Eroglu (2009), quando esse elemento é introduzido de forma dirigida, ele favorece a criação de camadas resistentes ao desgaste. No entanto, para garantir esse benefício, é essencial controlar a diluição entre metal de base e metal de adição, além de assegurar a integridade metalúrgica da zona fundida e da zona termicamente afetada, já estes fatores impactam diretamente a qualidade e a durabilidade do revestimento (CUI; WANG, 2022). Ademais, concentrações mais elevadas de boro podem ocasionar problemas de soldagem, como o surgimento de trincas ou porosidades (CAO et al, 2022).

O nióbio, por sua vez, contribui para o refino de grão e aumento da resistência por meio da formação de compostos como NbC e $Nb(C,N)$. Esses precipitados se distribuem na microestrutura, dificultando o movimento das discordâncias e melhorando tanto a resistência mecânica quanto a estabilidade térmica do material (KLINKENBERG; HULKA; BLECK, 2004). Quando bem balanceado com carbono e outros elementos, o nióbio pode elevar significativamente a resistência ao desgaste sem comprometer a tenacidade, sendo esta característica essencial para aplicações que exigem durabilidade e segurança estrutural.

Além da escolha dos elementos de liga, outro fator crítico é a taxa de diluição, que indica a fração do metal de base incorporada ao metal de adição. Esse parâmetro influencia diretamente a composição química da zona fundida e, portanto, as propriedades finais do revestimento (ZEEMANN, 2004). Para medi-la, utiliza-se a análise macroscópica das áreas penetrada e sobreposta do cordão.

A avaliação da qualidade do revestimento tem uma cobertura mais ampla quando aplicado uma análise microestrutural já que revela morfologia das fases, variações no tamanho de grão e constituição geral do material. Acompanhado disso, ensaios de microdureza Vickers na zona de fusão (ZF), zona termicamente afetada (ZTA) e metal de base (MB) permitem construir perfis que evidenciam gradientes funcionais e correlacionam microestrutura e microdureza, um elo fundamental para validar a eficácia das camadas endurecidas.

Em síntese, esta pesquisa propõe uma solução prática e reproduzível para modificação superficial por soldagem com eletrodo revestido, incorporando separadamente boro (B) e carbeto de ferro-nióbio (Fe-NbC) como variáveis de projeto, visando otimizar propriedades críticas para componentes sujeitos a desgaste e altas solicitações mecânicas. Para a caracterização, são empregadas métricas essenciais como taxa de diluição, microestrutura e perfis de microdureza, parâmetros que estão diretamente relacionados à durabilidade e ao desempenho em serviço, fatores indispensáveis para garantir confiabilidade e reduzir custos de manutenção.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental foi elaborado com o objetivo de avaliar o comportamento de revestimentos aplicados por soldagem com eletrodo revestido, considerando diferentes condições de umidade e composições de fluxo. Inicialmente, definiu-se o material base, os parâmetros de soldagem e os métodos de preparação das amostras, de modo a garantir reprodutibilidade e confiabilidade nos resultados. Após essa etapa de planejamento, as chapas de aço carbono A36 foram cortadas em dimensões adequadas para o processo, devidamente identificadas e preparadas para receber os revestimentos conforme os parâmetros estabelecidos.

As amostras foram confeccionadas a partir de chapas de aço com baixo teor de carbono, em função de sua elevada soldabilidade e fácil obtenção. As amostras foram seccionadas em corpos de prova com dimensões aproximadas de 150 mm de comprimento, 60 mm de largura e 10 mm de espessura. Previamente ao processo de soldagem, as superfícies foram preparadas por lixamento em um moto esmeril, com o objetivo de remover impurezas, como óleos, graxas e óxidos, garantindo melhor adesão do revestimento metálico.

No total, foram produzidos 6 corpos de prova retangulares, divididos em dois grupos compostos por três amostras cada, de modo a possibilitar a comparação entre diferentes fluxos e condições de aplicação. Os grupos experimentais foram definidos conforme o tipo de agente adicionado ao fluxo (boro ou Fe-NbC), permitindo analisar a influência de cada variável sobre as características metalúrgicas e mecânicas do revestimento.

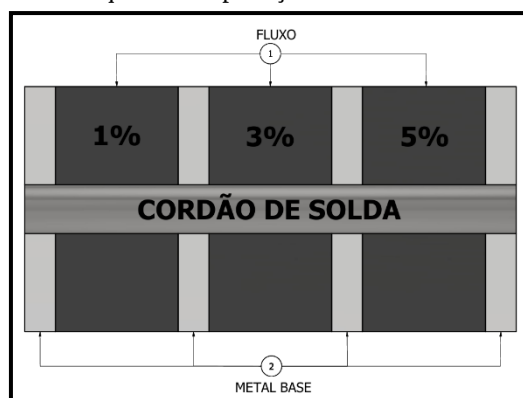
A preparação dos fluxos seguiu o mesmo procedimento para ambos os agentes. O primeiro tipo foi composto pelo agente boretante EkaBor, misturado a um solvente neutro de silicato de sódio, nas concentrações de 1%, 3% e 5% em peso, considerando um volume total de 100 ml. Para o segundo tipo de fluxo, o agente EkaBor foi substituído por Fe-NbC, mantendo-se as proporções e metodologia de preparação. Essa padronização possibilitou uma comparação direta entre os efeitos da adição de boro e de Fe-NbC sobre o desempenho dos revestimentos produzidos.

Inicialmente, o procedimento experimental previa a execução das soldagens apenas pela via úmida, com os fluxos sendo aplicados ainda frescos sobre a superfície dos corpos de prova. Entretanto, durante os testes iniciais, constatou-se dificuldade na manutenção estável do arco elétrico e diante dessa limitação, optou-se por incluir também a condição via seca, na qual os corpos de prova, após a aplicação do fluxo fresco, foram submetidos à secagem em estufa antes da soldagem. Essa modificação teve como propósito avaliar se a redução da umidade na superfície poderia melhorar a estabilidade do arco e a uniformidade do cordão, permitindo ainda uma análise comparativa entre as duas condições de soldagem. Com a introdução da via seca, o experimento passou a contar com 12 grupos de amostras, sendo 6 na condição úmida (3 com adição de boro e 3 com Fe-NbC) e 6 na condição seca, mantendo a proporção de composições.

Os 12 corpos de prova foram distribuídos em dois conjuntos principais, sendo seis amostras destinadas ao fluxo contendo boro e seis ao fluxo contendo Fe-NbC. Cada conjunto foi subdividido conforme a condição de aplicação do fluxo: via úmida, utilizando o fluxo recém-preparado, e via seca, em que o fluxo foi previamente submetido à secagem em estufa a 100 °C por 1 hora, seguida de resfriamento à temperatura ambiente. Dessa forma, estabeleceram-se quatro condições experimentais distintas (boro úmido, boro seco, Fe-NbC úmido e Fe-NbC seco), permitindo a análise sistemática do efeito de cada combinação sobre as propriedades resultantes do revestimento.

Em cada corpo de prova, foram realizadas três camadas transversais ao comprimento da amostra, correspondentes às três concentrações de fluxo (1%, 3% e 5%). As camadas foram aplicadas de forma equidistante, iniciando-se pela extremidade esquerda (1%), passando pela região central (3%) e finalizando na extremidade direita (5%), conforme ilustrado na Figura 1. Essa disposição permitiu a avaliação comparativa direta do comportamento metalúrgico em função da concentração do agente adicionado.

Figura 1 – Esquema de aplicação das camadas nas amostras

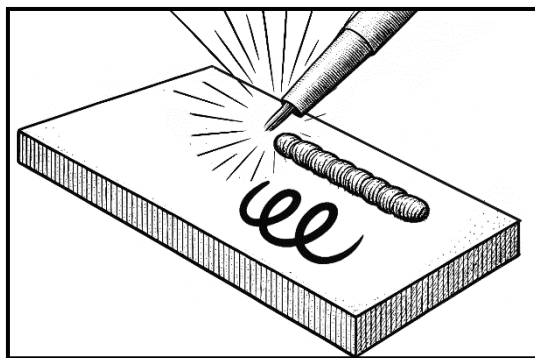


Fonte: Elaboração dos autores (2025).

A soldagem foi executada pelo processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW), utilizando o eletrodo AWS E6013, com diâmetro de 2,5 mm e corrente de soldagem de 80 A. A escolha desses parâmetros baseou-se em testes preliminares que demonstraram maior estabilidade do arco elétrico nessa condição, considerando a espessura das chapas utilizadas. O eletrodo E6013 foi selecionado por sua ampla aplicação em aços de baixo carbono e por apresentar comportamento amplamente documentado, minimizando interferências externas na análise dos efeitos provocados pelos agentes modificadores.

Durante o processo, os cordões de solda foram depositados ao longo do comprimento das amostras, sobre as três regiões previamente recobertas pelos fluxos de diferentes concentrações. A soldagem foi realizada manualmente, na posição plana (1G), mantendo-se constante a distância do arco e a velocidade de soldagem, estabelecida em aproximadamente 2,5 mm/s. Outro ponto importante, o cordão de solda foi construído com a execução dos movimentos de espiral, de acordo com a Figura 2 abaixo. As mesmas condições operacionais foram aplicadas a todas as amostras, tanto nas vias úmida quanto seca.

Figura 2 – Movimento do eletrodo durante soldagem.



Fonte: Elaboração dos autores (2025).

Após a soldagem, a escória residual foi removida com martelo picador e escova de aço. Em seguida, procedeu-se a inspeção visual, complementada por registro fotográfico, para identificação de descontinuidades superficiais, como trincas, mordeduras ou porosidades. Com base nessa avaliação inicial a olho nu, foram realizados o corte controlado das amostras nas regiões de interesse e o embutimento em resina apropriada, permitindo a manipulação segura e a padronização das seções para as etapas subsequentes de lixamento, polimento e ataque químico.

Posteriormente, os corpos de prova foram submetidos à preparação metalográfica, iniciando-se pelo lixamento mecânico, realizado em politriz lixadora com lixas de granulações progressivas (80, 100, 320, 600, 1200 e 2000), a fim de remover irregularidades superficiais e obter uma textura uniforme. Em seguida, procedeu-se ao polimento final, executado em equipamento da marca Teclago, utilizando suspensão de alumina com granulometria de 0,3 µm, de modo a garantir uma superfície lisa e livre de deformações. Por fim, realizou-se o ataque químico com solução de Nital a 3%, aplicado por aproximadamente 5 segundos, podendo variar ligeiramente conforme a resposta visual do material, conforme os procedimentos estabelecidos pela norma ASTM E3-11 (2011), permitindo a revelação das microestruturas das regiões soldadas.

Antes da análise microscópica, foi realizada a macrografia das amostras, com o objetivo de avaliar a morfologia geral dos cordões de solda e identificar eventuais descontinuidades superficiais ou internas. As superfícies analisadas foram

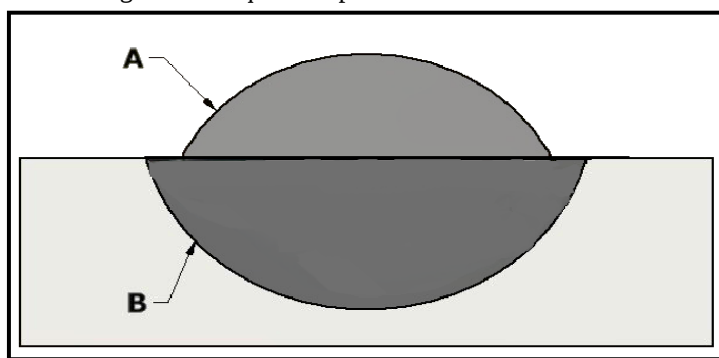
preparadas de forma a permitir a observação nítida das regiões de interesse, e o ataque químico foi aplicado para evidenciar o contorno entre o metal de base (MB), a zona de fusão (ZF) e a zona termicamente afetada (ZTA). As imagens macroscópicas obtidas através do Estereomicroscópio Lumen possibilitaram a análise da geometria do cordão, da penetração do metal de adição e da extensão da ZTA, parâmetros fundamentais para avaliar a qualidade do processo e a uniformidade dos depósitos. Essa etapa também foi essencial para orientar a escolha das regiões que seriam posteriormente avaliadas em maior detalhe na análise microscópica.

A etapa seguinte envolveu a análise quantitativa das regiões soldadas com o auxílio do software ImageJ. As imagens obtidas por microscopia óptica foram processadas no programa para determinar as áreas correspondentes ao MB, à ZTA e à ZF. A partir dessas medições, foi possível calcular a taxa de diluição (D) de cada amostra, conforme a Equação (1), que relaciona as áreas fundidas e total depositada:

$$D = \frac{B}{(A + B)} \cdot 100 \quad (1)$$

em que B representa a área fundida do metal base e A corresponde à área de metal depositado. Esta relação pode ser melhor observada a partir do esquema da Figura 3.

Figura 3 – Esquema representativo das áreas A e B.



Fonte: Elaboração dos autores (2025).

Essa análise permitiu quantificar a proporção de mistura entre o material de adição e o metal base, fornecendo subsídios para correlacionar os parâmetros de soldagem e as características geométricas dos cordões formados.

Em seguida, as amostras foram analisadas por microscopia óptica por meio do Microscópio Metalúrgico Insize ISM-M1000, com ampliações de até 400× e câmera digital Opton 5.1MP para visualização das superfícies pelo software ScopePhoto3.0 no computador, utilizando iluminação incidente e objetiva de alto contraste, de modo a possibilitar a observação detalhada das microestruturas formadas nas regiões soldadas. Essa etapa teve como finalidade principal identificar as fases constituintes resultantes do processo de soldagem, bem como caracterizar a morfologia dos grãos e as possíveis transformações metalúrgicas ocorridas nas ZF, ZTA e MB. Com estas análises é possível verificar a presença de defeitos típicos de soldagem, como trincas, inclusões, porosidades e descontinuidades superficiais, que podem comprometer o desempenho mecânico do revestimento. As observações foram registradas por meio de micrografias digitais, obtidas em diferentes regiões de interesse, permitindo posterior comparação entre as amostras produzidas por via úmida e via seca, assim como entre os fluxos contendo boro e Fe-NbC.

O ensaio de microdureza foi executado por meio de Microdurômetro Vickers Digimess HV-1000, com medições realizadas em quinze pontos por amostra, sendo cinco na ZF, cinco na ZTA e cinco no MB. Os pontos foram dispostos horizontalmente, com espaçamento equidistante conforme norma ASTM E384. Esse procedimento possibilitou avaliar a variação de microdureza ao longo das diferentes regiões do cordão de solda.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Imediatamente após a execução da soldagem, foi realizada uma inspeção visual como primeira etapa de avaliação da integridade da estrutura formada. A análise não identificou a presença de porosidades ou trincas aparentes, observando-se apenas uma quantidade mínima de escória nas bordas laterais do cordão de solda, sem indícios de comprometimento visual da qualidade estrutural. Tal ocorrência é fruto direto de erro na execução da limpeza das amostras, ficando mais evidente na Figura 4.

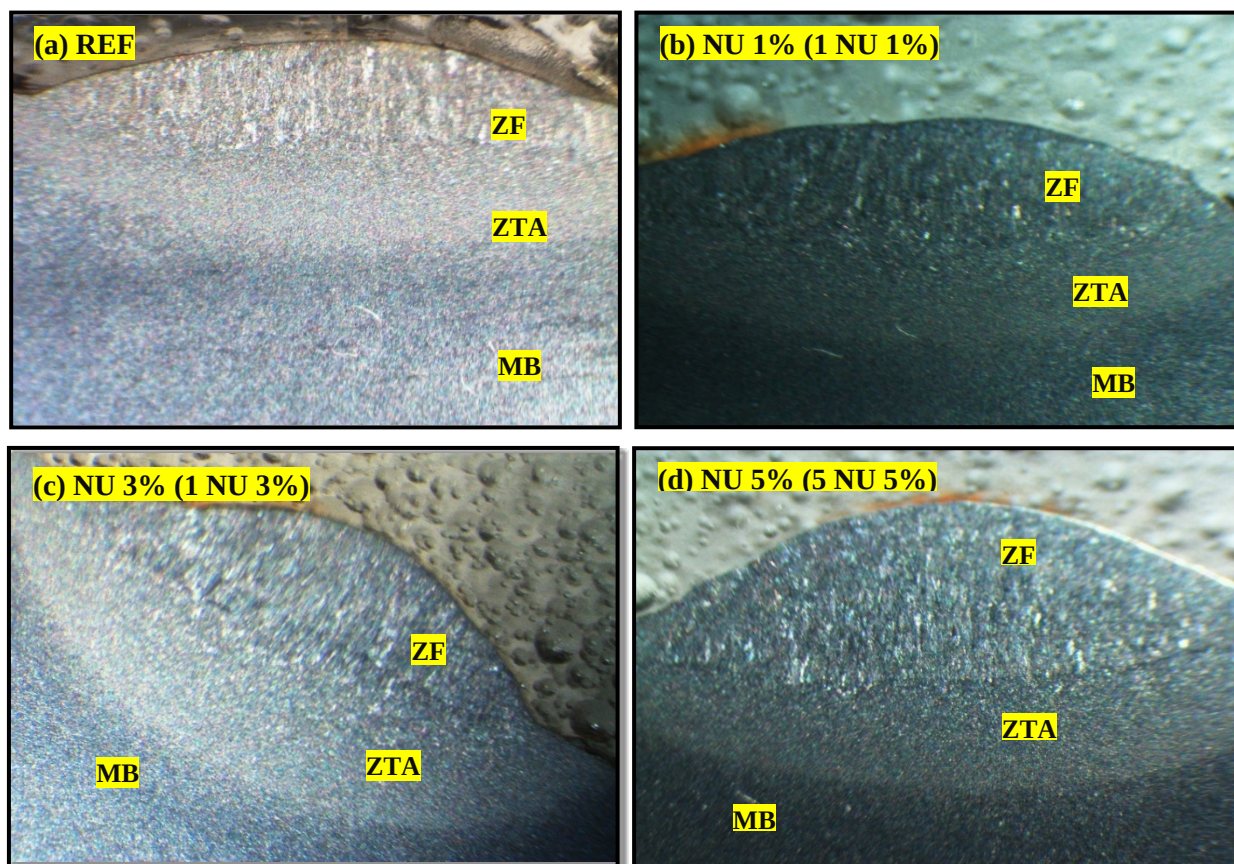
Figura 4 – Registro fotográfico de uma das amostras do grupo NS com concentração de 1%.

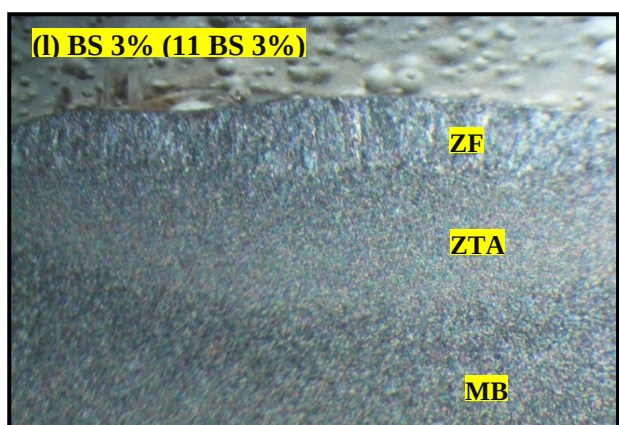
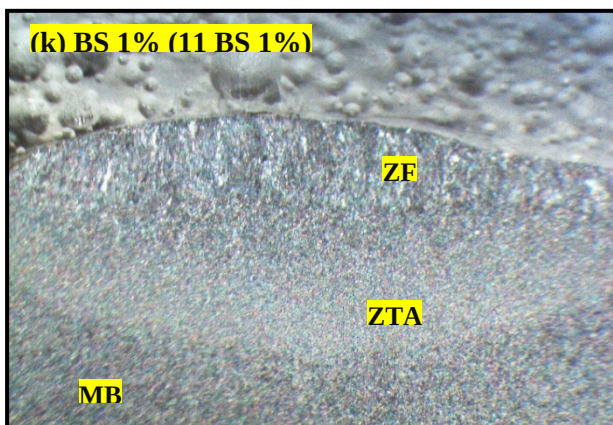
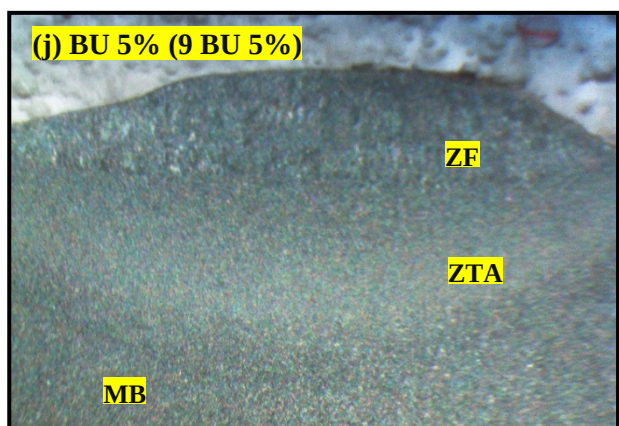
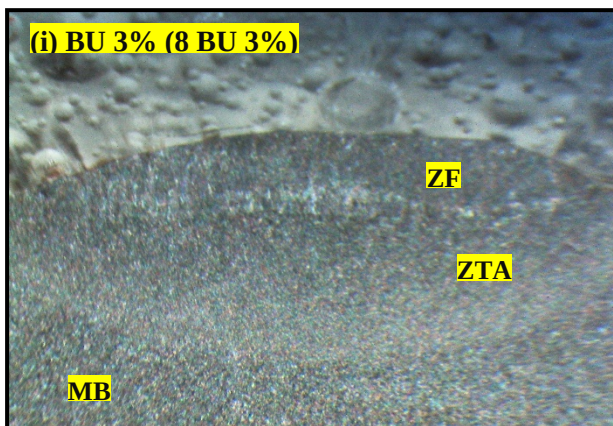
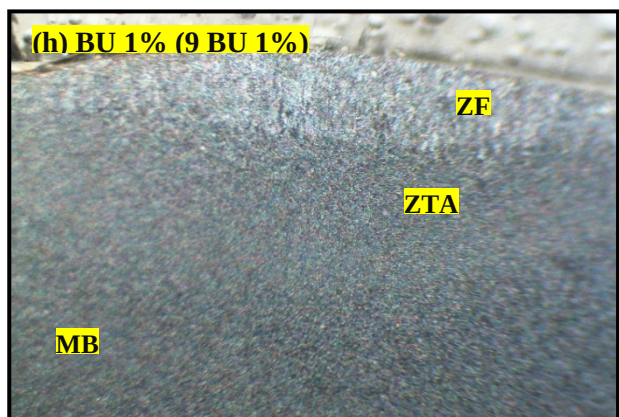
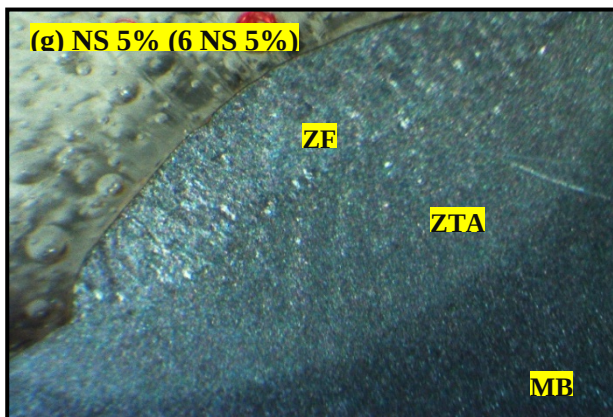
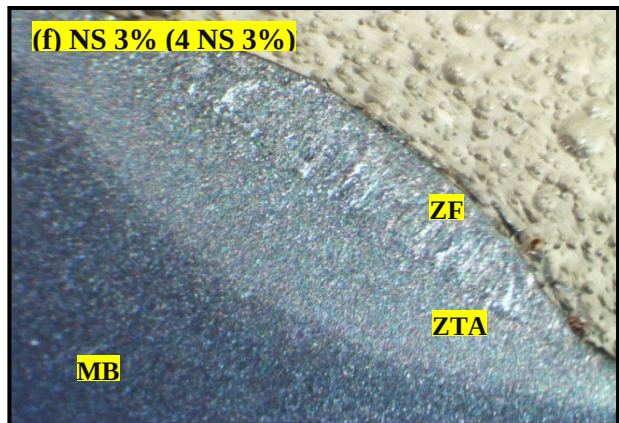
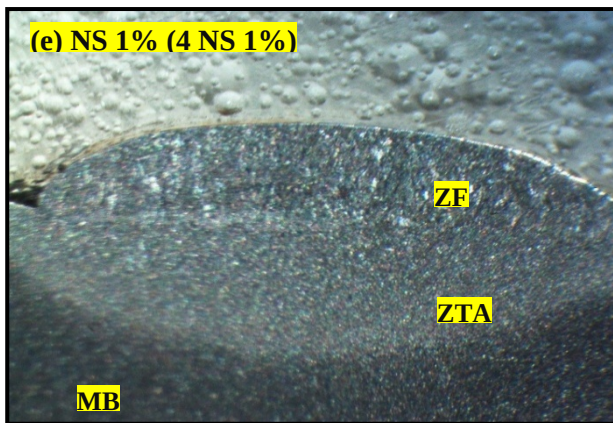


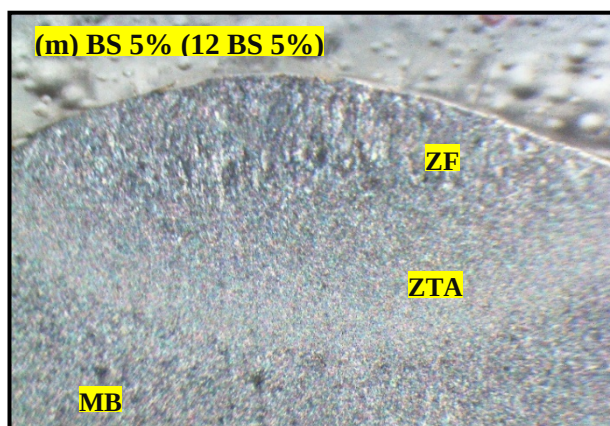
Fonte: Autores (2025).

As análises macrográficas, empregadas para a determinação da taxa de diluição, também permitiram uma avaliação interna da zona fundida, corroborando a ausência de defeitos relevantes e evidenciando a consistência do processo de deposição, conforme Figura 5.

Figura 5 – Macroscopias das amostras na ampliação de 1,4x.



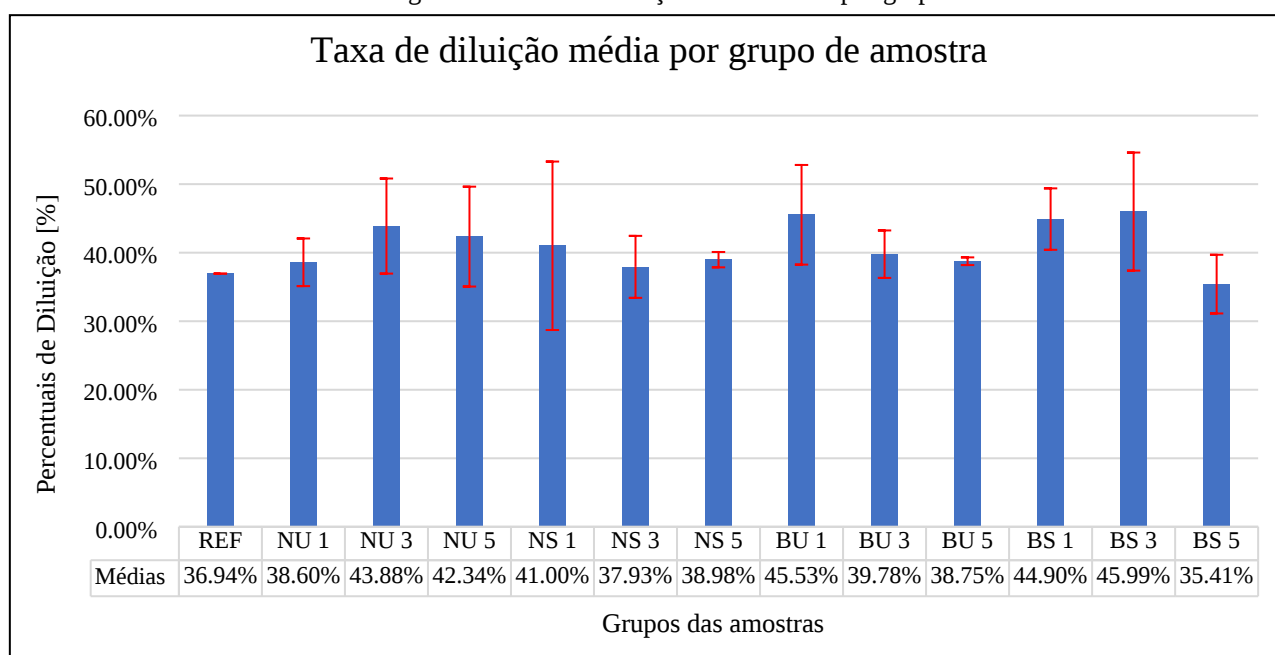




Fonte: Autores (2025).

Em seguida, a partir da medição das zonas já identificadas, as taxas de diluição foram calculadas com os parâmetros configurados para a prática experimental e estão apresentadas na Figura 6.

Figura 6 – Taxas de diluição das amostras por grupo.



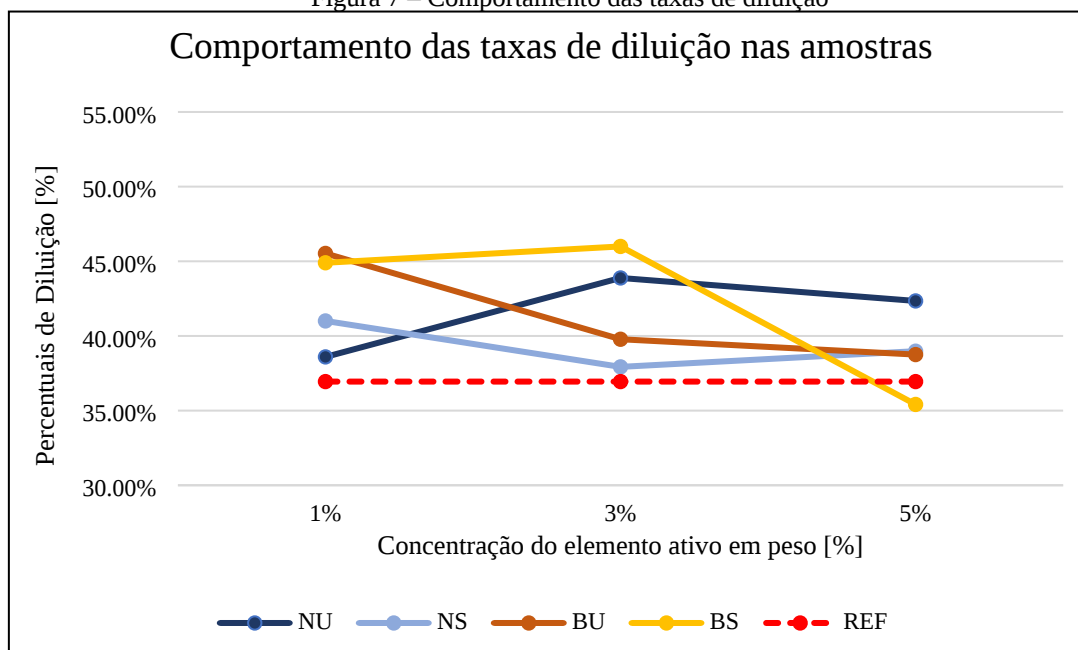
Fonte: Elaboração dos autores (2025).

Ao comparar os resultados obtidos com a taxa de diluição da amostra de referência (36,94%), observa-se uma variação relativamente pequena, sendo que a média geral das taxas de diluição entre todos os grupos foi de 40,77%. As barras de erro apresentadas no gráfico foram determinadas com base no desvio padrão calculado dentro de cada grupo de amostras, composto por três réplicas, o que permite avaliar a dispersão dos dados e a confiabilidade estatística das médias obtidas. A única exceção é o grupo REF, que possui apenas uma amostra, não permitindo o cálculo de desvio padrão para esse caso.

Essa proximidade entre os valores indica uma consistência aceitável nos procedimentos de soldagem realizados. De acordo com Kumar et al. (2021), os parâmetros de soldagem exercem influência significativa sobre a taxa de diluição. Dentre eles, a velocidade de soldagem e a corrente aplicada destacam-se como fatores determinantes para o aumento da profundidade de penetração, independentemente do processo de soldagem utilizado.

Um padrão notado nos subgrupos para Fe-NbC (NU e NS) é o comportamento instável, enquanto na mesma medida é percebida uma tendência de decréscimo na taxa de diluição conforme aumento de concentração do elemento químico para boro (BU e BS). Tal tendência é evidenciada na Figura 7.

Figura 7 – Comportamento das taxas de diluição



Fonte: Elaboração dos autores (2025).

A análise das taxas de diluição evidencia que as variações observadas entre os grupos experimentais resultam não apenas da influência do agente adicionado ao fluxo e da rota de aplicação, mas também da natureza manual do processo SMAW, que introduz variabilidade operacional inevitável. A condição úmida mostrou maior sensibilidade às flutuações do arco elétrico devido à presença de umidade no fluxo, afetando a estabilidade térmica da poça de fusão e, consequentemente, a diluição. Já a rota seca apresentou comportamento mais uniforme, refletindo a maior estabilidade do arco após a remoção da umidade.

Nos grupos contendo Fe-NbC, tanto na condição úmida (NU) quanto na seca (NS), observa-se que os valores de diluição apresentam variações moderadas entre as concentrações de 1%, 3% e 5%, mantendo-se dentro de uma faixa relativamente estreita. Embora haja oscilações pontuais, especialmente no grupo NU, os valores permanecem próximos entre si, caracterizando um comportamento interno estável, semelhante ao que Pollnow (2021) descreve ao analisar séries de amostras com pequenas flutuações dentro da margem de erro para taxas de diluição.

Já nos grupos contendo boro, tanto na via úmida (BU) quanto na via seca (BS), nota-se que as taxas de diluição variam de forma mais evidente entre as diferentes concentrações, porém ainda mantendo um padrão interno identificável. No grupo BU, os valores diminuem progressivamente ao longo das concentrações, enquanto no grupo BS ocorre uma oscilação entre leve aumento e queda significativa.

Como o processo foi executado manualmente, pequenas variações na velocidade de avanço, no comprimento do arco e na inclinação do eletrodo podem ter amplificado essas diferenças, uma vez que tais parâmetros influenciam diretamente o aporte térmico e a geometria da poça de fusão. Assim, parte da dispersão observada nas médias pode ser atribuída à variabilidade inerente ao operador, reforçando que, embora tendências claras sejam identificáveis, a interpretação dos resultados deve considerar a contribuição humana como fator adicional de dispersão.

Em sistemas de revestimento, entretanto, mais importante do que a variação entre grupos é compreender que a taxa de diluição deve ser controlada para permanecer em níveis reduzidos. O objetivo é concentrar o material de liga na superfície, evitando mistura excessiva com o metal de base que poderia modificar a composição projetada e comprometer o desempenho final esperado. Para revestimentos funcionais, diluições baixas são mais eficazes por preservarem propriedades superficiais e aumentarem a vida útil do material depositado (ROVATTI et al., 2015). Nesse sentido, a análise realizada não busca apenas comparar valores entre grupos, mas demonstrar a necessidade de manter a diluição em menor grau para a construção de camadas superficiais e não de juntas estruturais.

Embora a análise da taxa de diluição forneça uma visão inicial sobre o comportamento dos revestimentos, esse parâmetro isolado não é suficiente para definir a qualidade final do material depositado.

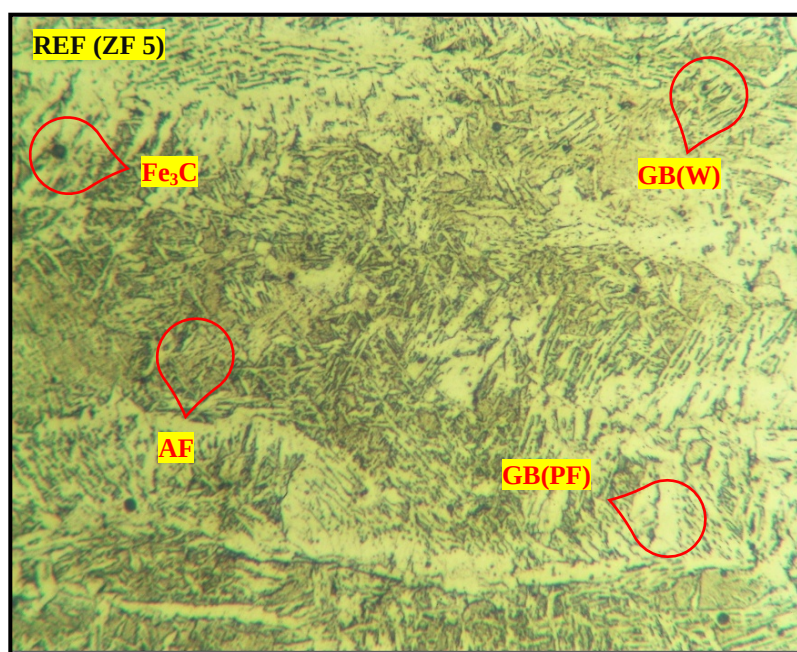
Na sequência, a análise micrográfica iniciou-se pela amostra de referência. Observou-se uma combinação típica de estruturas formadas na ZF de aços de baixo carbono solidificados sem a presença de elementos modificadores, refletindo o comportamento natural da liga. Percebeu-se a presença de ferrita acicular (AF) formada durante o resfriamento moderadamente rápido da austenita, caracterizada por sua morfologia alongada, onde, de acordo com Cho et al. (2022), atua como barreira à propagação de trincas e contribui diretamente para o aumento da resistência mecânica.

Também foi observada ferrita Widmanstätten de contorno de grão (GB(W)), identificada por suas ripas orientadas a partir dos contornos de grão, típica de transformações em temperaturas intermediárias. Essa fase confere maior rigidez

estrutural, embora reduza a ductilidade (ZHAO et al., 2022). Em contraste, verificou-se a presença de ferrita poligonal de contorno de grão (GB(PF)), formada em temperaturas mais elevadas, apresentando morfologia equiaxial e contornos bem definidos. Essa fase é reconhecida por conferir maior ductilidade ao material, uma vez que o formato do seu grão reduz a concentração de tensões e dificultam a propagação de trincas (CHO et al., 2022).

Foram identificados pontos escuros associados à cementita, ou carbeto de ferro (Fe_3C), resultantes da segregação de carbono durante a solidificação. Esses precipitados atuam como regiões de endurecimento localizado, mas podem gerar fragilidade quando presentes em excesso (YUAN et al., 2025). Todas essas características podem ser observadas na Figura 8.

Figura 8 – Microestrutura da ZF em amostra de referência na ampliação de 400x.



Fonte: Autores (2025).

Nas amostras soldadas via úmida com adição de Fe-NbC, no geral, observa-se a formação mais expressiva de microestrutura colunar dendrítica, orientada ao longo do gradiente térmico imposto pelo sentido de extração de calor. Essa configuração indica que a interface de solidificação evolui de forma colunar, com os dendritos se desenvolvendo na direção da dissipação térmica (POLLNOW, 2021). Os grãos resultantes apresentam morfologia ramificada, semelhante à estrutura de um pinheiro, característica típica de crescimento dendrítico e oferecem redução na tenacidade e baixa resistência (VILLARET, 2016). Além disso, é possível identificar o aumento progressivo de nucleações de carbeto de nióbio (NbC) distribuídas em todas as amostras obtidas conforme aumento da concentração de Fe-NbC.

Em todas as amostras obtidas por soldagem em meio úmido, identificaram-se também ferritas aciculares e ferritas Widmanstätten de contorno de grão adjacentes às regiões colunares dendríticas.

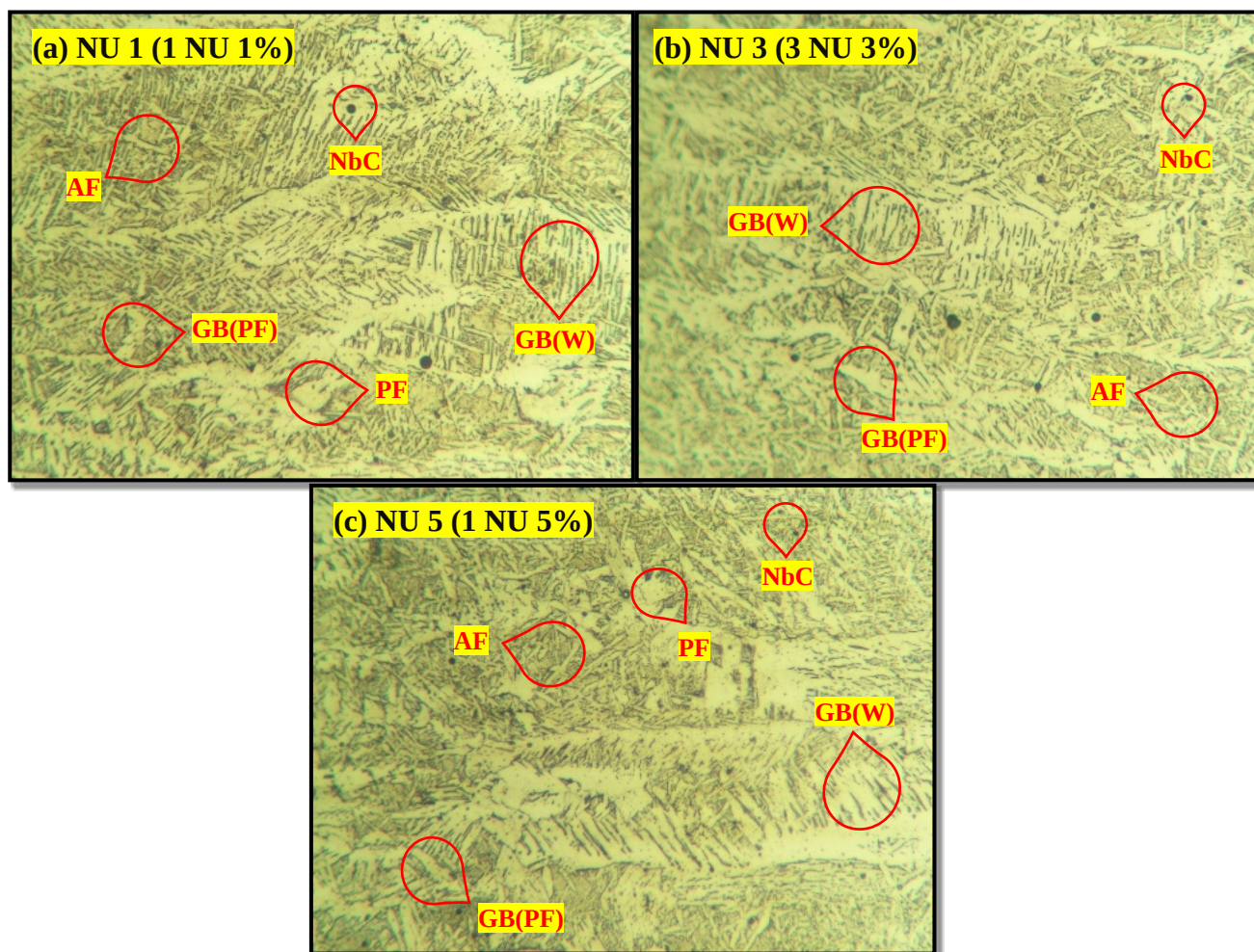
Observando grupo a grupo, nas amostras submetidas à soldagem em meio úmido contendo 1% de Fe-NbC (Figura 11.a), a microestrutura revelou predominância de ferrita poligonal e ferrita poligonal de contorno de grão, em decorrência da formação colunar. A presença da ferrita Widmanstätten de contorno de grão se mostra mais presente nesta concentração junto às formações colunares.

Com o incremento da concentração para 3% de Fe-NbC (Figura 11.b) no grupo seguinte, verificou-se a ocorrência de ferrita poligonal de contorno de grão, ferrita Widmanstätten de contorno de grão, além da precipitação de carbeto de nióbio atuando como barreiras à movimentação de discordâncias e favorecendo o endurecimento pontual na matriz (KLINKENBERG; HULKA; BLECK, 2004).

No último grupo, na condição de 5% de Fe-NbC (Figura 11.c), a microestrutura apresentou ferrita poligonal, ferrita poligonal de contorno de grão, ferrita acicular disposta em agrupamentos localizados, ferrita Widmanstätten de contorno de grão e formação de pequenos carbeto de nióbio, localizadas principalmente nos contornos dos dendritos e regiões interdendríticas,

Apesar da variação na concentração de Fe-NbC, as estruturas predominantes mantiveram-se semelhantes, com mudanças discretas na distribuição e quantidade de carbeto de nióbio NbC e outras fases.

Figura 11 – Microestrutura da ZF em amostras soldadas via seca com fluxo contendo Fe-NbC incorporado na ampliação de 400x



Fonte: Autores (2025).

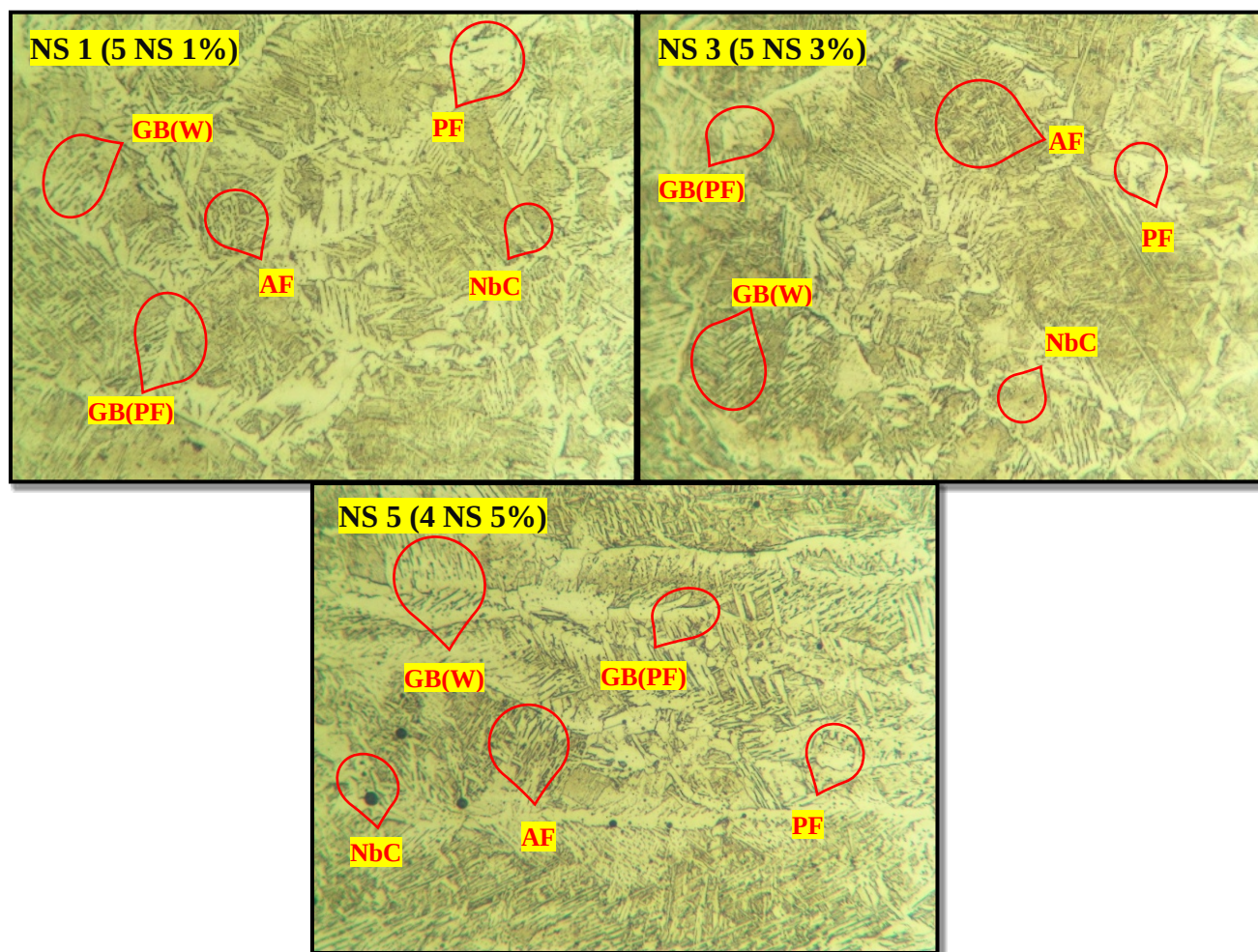
Avaliando separadamente os conjuntos de amostras soldadas via seca com adição de Fe-NbC, a microestrutura da condição com 1% de Fe-NbC (Figura 12.a) apresentou elevada ocorrência de ferrita acicular, além de ferrita poligonal e ferrita poligonal de contorno de grão, esta última em maior frequência em função do gradiente térmico e da extração de calor, que se distribuem em múltiplas direções ao longo da micrografia. Também foram identificadas ferrita Widmanstätten de contorno de grão e pequenas nucleações de carbeto de nióbio dispersas pela matriz.

Na concentração de 3% de Fe-NbC (Figura 12.b), observou-se discreta redução na quantidade de ferrita acicular, mantendo-se a presença de ferrita poligonal de contorno de grão e ferrita Widmanstätten de contorno de grão, em conformidade com a amostra anterior. As formações colunares permaneceram distribuídas em múltiplas direções, novamente acompanhadas por pequenas nucleações de carbeto de nióbio.

Para a condição com 5% de Fe-NbC (Figura 12.c), a microestrutura manteve configuração semelhante às amostras anteriores, diferenciando-se, contudo, pela orientação horizontal das colunas dendríticas formadas a partir do gradiente térmico de extração de calor, atravessando a amostra da esquerda para a direita. Além disso, verificaram-se nucleações de carbeto de nióbio mais desenvolvidas, ainda de morfologia circular e pontual escura, porém de maior dimensão em comparação às concentrações precedentes.

Assim como observado na rota anterior, mesmo com variações na concentração, o fluxo de Fe-NbC produziu resultados semelhantes na soldagem via seca, mantendo a recorrência das mesmas fases ferríticas previamente identificadas.

Figura 12 – Microestrutura da ZF em amostras soldadas via seca com fluxo contendo Fe-NbC incorporado na ampliação de 400x



Fonte: Autores (2025).

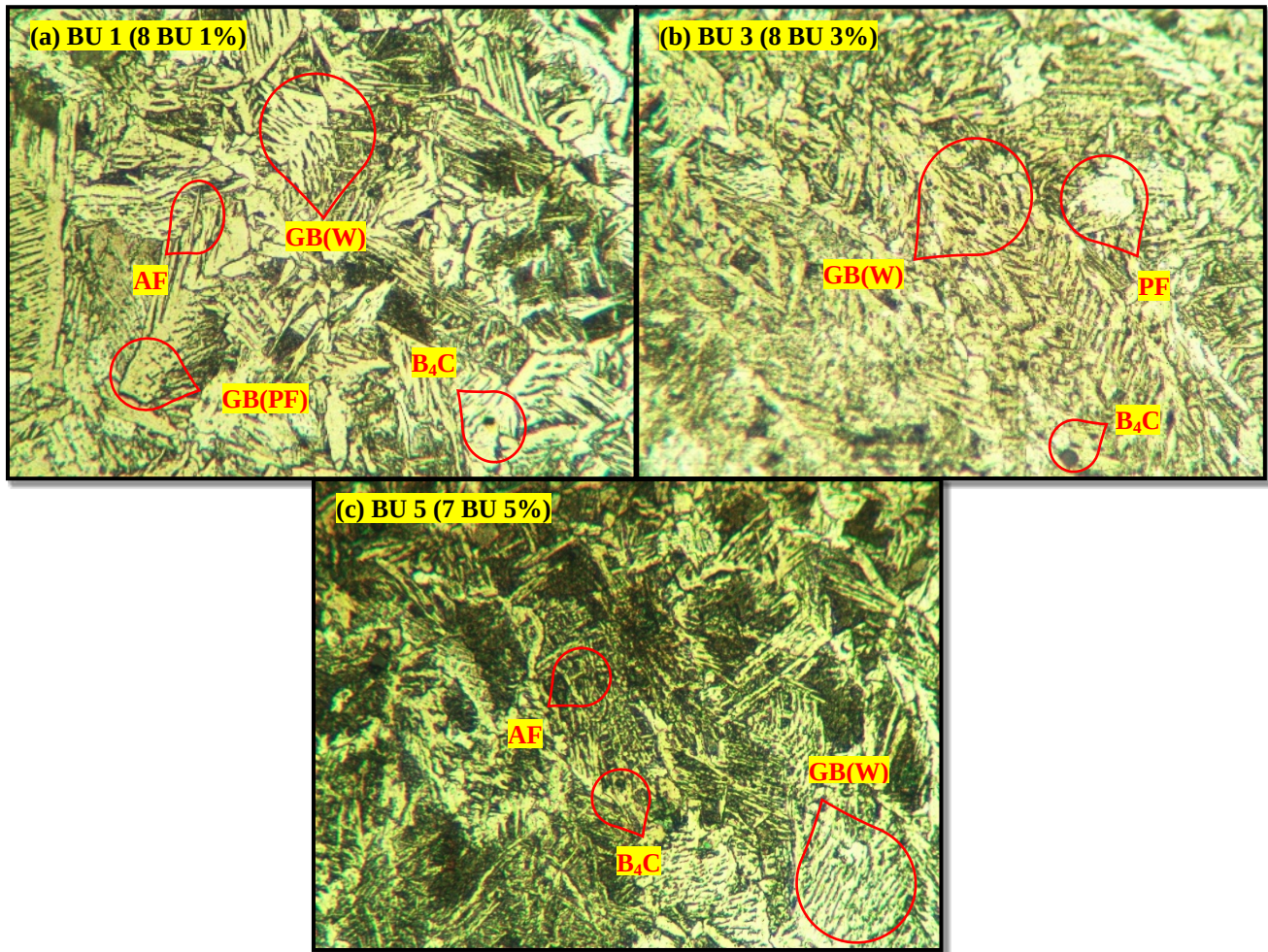
Nas amostras via úmida com adição de boro, observaram-se variações significativas nas microestruturas em função da concentração do elemento. Com 1% de boro (Figura 9.a), a microestrutura apresentou ferrita acicular, ferrita poligonal, ferrita poligonal de contorno de grão e uma quantidade expressiva de ferrita Widmanstätten de contorno de grão.

A presença acentuada de Widmanstätten está associada à microvariações térmicas decorrentes da instabilidade do arco em meio úmido, condição que favorece flutuações no resfriamento e, consequentemente, a formação de morfologias mais sensíveis às oscilações térmicas, comportamento compatível com o observado por Cui e Wang (2022), que destacam a forte influência das condições de soldagem sobre a distribuição das fases em metais de solda contendo boro. Pequenos carbeto de boro (B_4C) também foram identificados, dispersos na matriz. Esses precipitados, visíveis como pontos escuros, resultam da reação entre o boro incorporado ainda em estado fresco e o carbono liberado durante a solidificação.

Ao elevar a concentração para 3% de boro (Figura 9.b), verificou-se redução da fração de ferrita acicular e predominância da ferrita poligonal. Esse comportamento está relacionado ao aumento da quantidade de precipitados ricos em boro, como o B_4C , que passam a atuar como sítios preferenciais de nucleação para ferrita. Estudos recentes mostram que compostos contendo boro apresentam elevada capacidade de atuar como nucleantes devido à sua estabilidade térmica e à forte interação com carbono, favorecendo a formação de ferrita de morfologia mais estável (LIU et al., 2025).

Com 5% de boro (Figura 9.c), a microestrutura voltou a apresentar ferrita acicular, acompanhada de ferrita Widmanstätten de contorno de grão e pequenas ilhas de carbeto. Esse conjunto sugere intensificação da dissociação do carbono da matriz austenítica, promovendo maior precipitação de compostos ricos em boro. Esse efeito é coerente com os resultados de Cui e Wang (2022), que observaram que o aumento do teor de boro intensifica a segregação de carbono durante a solidificação, favorecendo a formação de carbeto.

Figura 9 – Microestrutura da ZF em amostras soldadas via úmida com fluxo contendo boro incorporado na ampliação de 400x.



Fonte: Autores (2025).

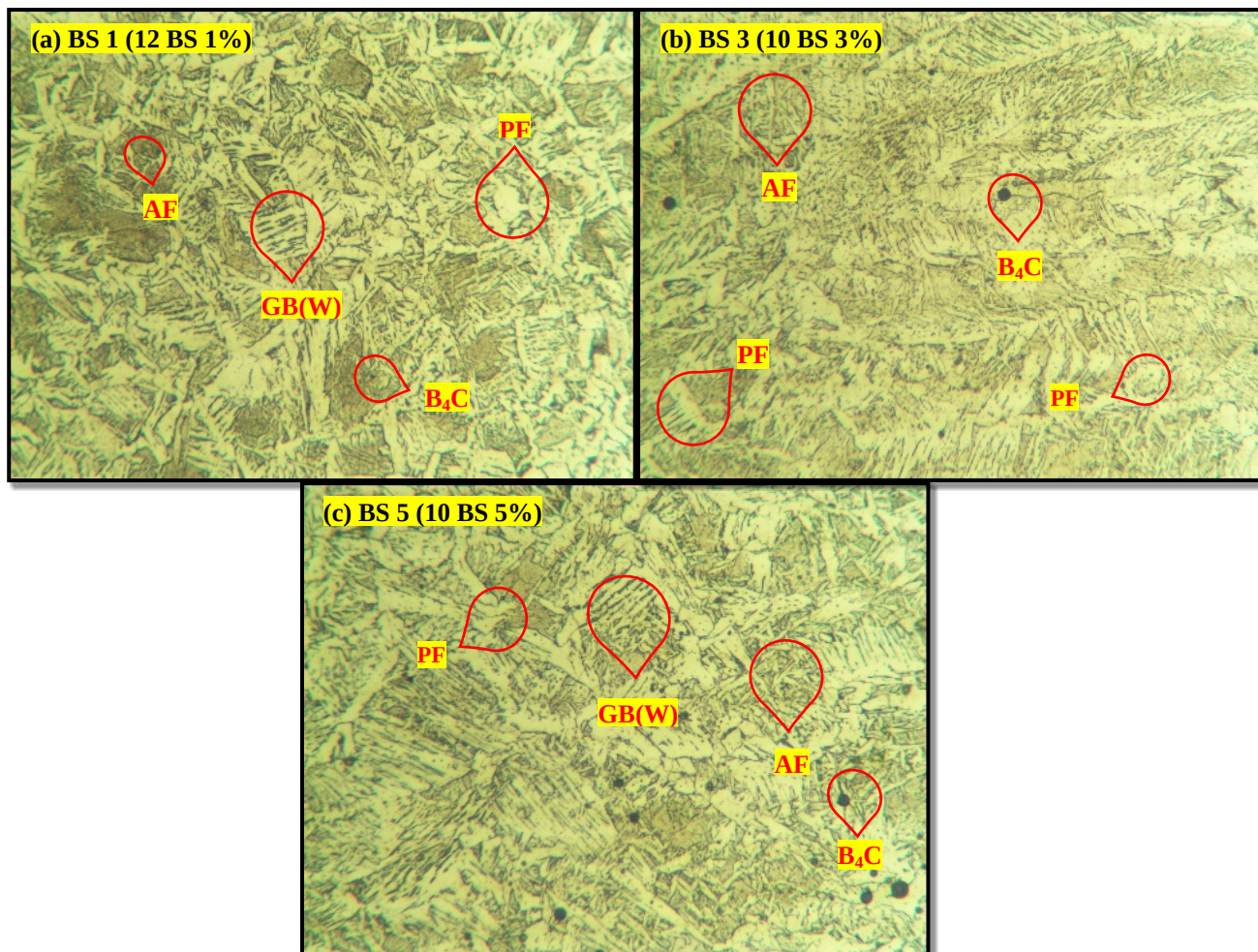
Nas amostras soldadas via seca com adição de boro, com o aumento da concentração de boro, observou-se intensificação da formação de ferrita acicular, distribuída de maneira mais uniforme na matriz, indicando resfriamento mais acelerado e condições favoráveis à nucleação.

Com 1% de boro (Figura 10.a), a microestrutura foi composta predominantemente por ferrita poligonal e ferrita Widmanstätten de contorno de grão. Além disso, notou-se pouca formação de ferrita acicular quando comparado com os grupos com concentração maiores.

A 3% de boro (Figura 10.b), identificaram-se ferritas poligonais, ferrita de contorno de grão e carbeto finamente dispersos, evidenciando maior influência do boro na formação de fases endurecedoras. Nesta porcentagem houve um pequeno aumento na formação de ferritas aciculares.

Com 5% de boro (Figura 10.c), os carbeto de boro tornaram-se mais evidentes, evoluindo de pequenas partículas dispersas para núcleos mais definidos, reforçando a matriz com fases duras. Em concentrações mais elevadas, esses carbeto apresentaram tendência à aglomeração em regiões específicas, sugerindo possível saturação local, o que pode aumentar o endurecimento, mas também indicar risco de fragilização pontual.

Figura 10 – Microestrutura da ZF em amostras soldadas via seca com fluxo contendo boro incorporado na ampliação de 400x.



Fonte: Autores (2025).

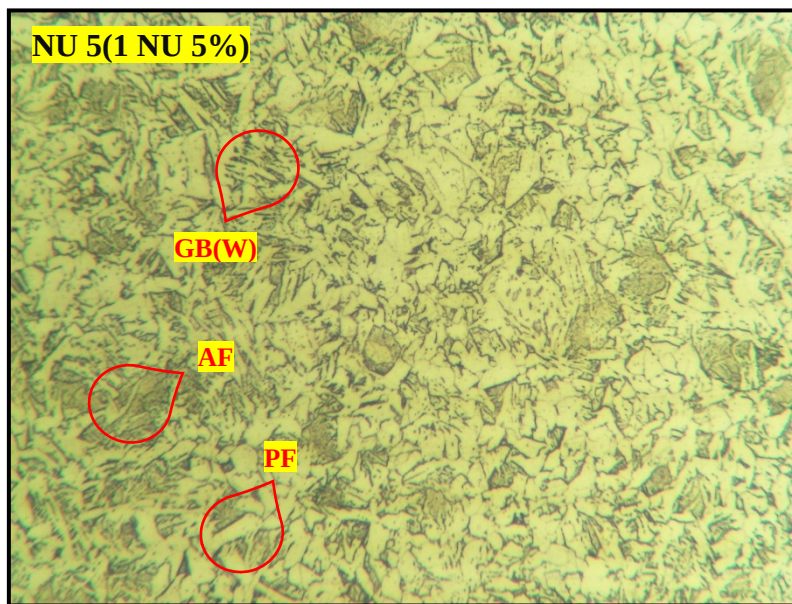
Apesar das evidências micrográficas obtidas das ZF, é importante reconhecer que a identificação visual das fases e o simples exame do tamanho de grão não permitem, por si só, estabelecer uma correlação direta e definitiva com as propriedades mecânicas do metal de solda. Como enfatiza Lancaster (1999), a resposta mecânica dos cordões de solda depende de um conjunto muito mais amplo de fatores microestruturais, incluindo a morfologia, a presença de precipitados nos contornos de grão, heterogeneidades locais de solidificação e até mesmo variações térmicas inerentes ao processo de soldagem. Dessa forma, para uma interpretação mais precisa das propriedades resultantes, é fundamental realizar ensaios específicos que permitam avaliar de maneira adequada o impacto dessas características.

Após as análises da ZF de todos os grupos, procedeu-se à avaliação da ZTA. Para as análises microestruturais da ZTA, todas as amostras, independentemente do elemento químico adicionado ou da condição de soldagem empregada (úmida ou seca), apresentaram comportamento semelhante. A microestrutura foi composta predominantemente por ferrita poligonal, com ocorrência esporádica de ferrita Widmanstätten e/ou ferrita acicular. De modo geral, esse padrão repetiu-se em todas as micrografias avaliadas.

Nesta região, observa-se uma definição mais nítida dos contornos de grão, indicando o início de processos de transição e rearranjo microestrutural. Os grãos apresentam-se progressivamente mais poligonais e com fronteiras mais bem delineadas, evidenciando a tendência de estabilização da microestrutura da ZTA.

Na ZTA da amostra 1 NU com 5% de adição, observa-se predominância de ferrita poligonal em abundância. Identificam-se, ainda, algumas formações de ferrita Widmanstätten de contorno de grão pouco desenvolvidas, além da ocorrência esporádica de ferrita acicular dispersa na microestrutura. A Figura 13 ilustra de maneira representativa esse comportamento característico da região analisada.

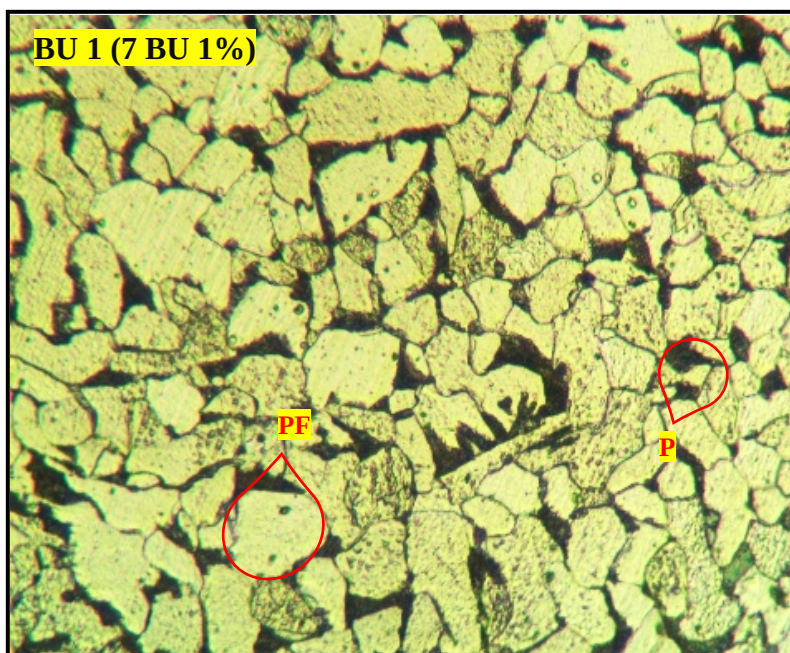
Figura 13 – Microestrutura da ZTA em amostras soldadas via úmida com fluxo contendo Fe-NbC na ampliação de 400x.



Fonte: Autores (2025).

Quanto à análise da microestrutura do metal de base (MB), verificou-se comportamento uniforme em todas as amostras, caracterizado pela presença de ferrita poligonal e perlita em todas as microscopias, conforme ilustrado na Figura 14. Observam-se de forma nítida os contornos de grão da composição original do material, os quais se apresentam maiores e com fronteiras mais bem definidas. Tal resultado era esperado, uma vez que o metal de base corresponde a uma região que não sofre modificações significativas decorrentes da adição de elementos de liga, ou da concentração térmica durante o processo de soldagem, preservando, portanto, sua microestrutura inicial. Esses achados estão em consonância com o que foi descrito por Kornokar et al. (2022).

Figura 14 – Microestrutura do MB em amostras soldadas via úmida com fluxo contendo Fe-NbC e soldadas via úmida com fluxo contendo boro na ampliação de 400x.

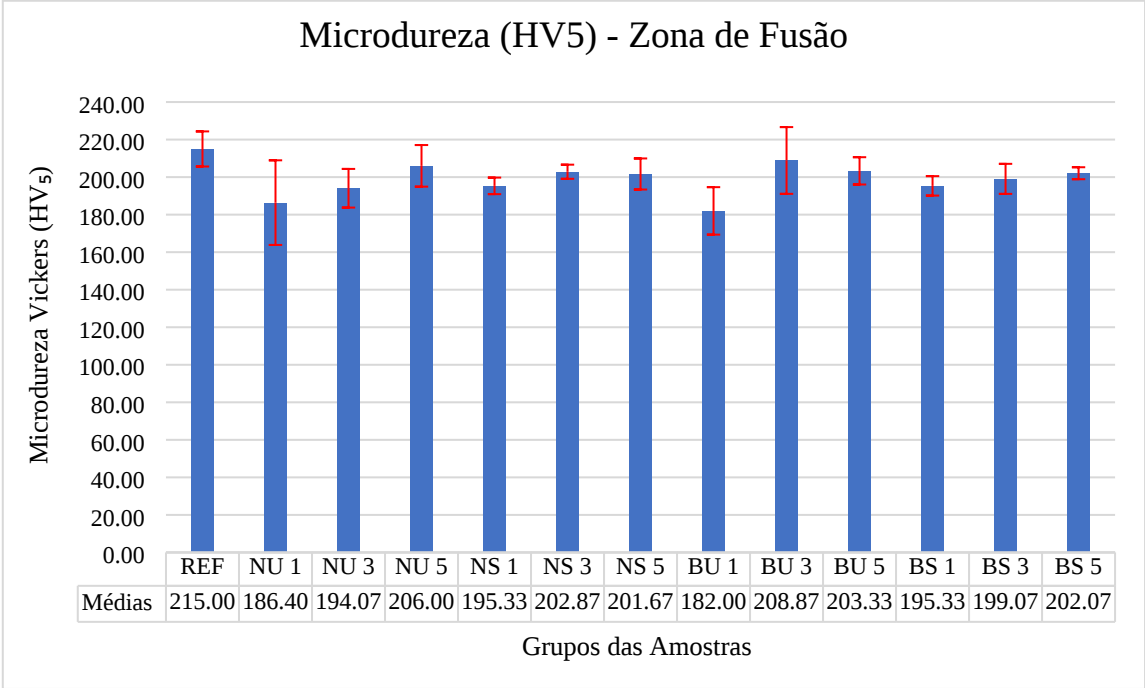


Fonte: Autores (2025).

Para verificação da caracterização mecânica obtida dos revestimentos foi conduzido ensaios de microdureza Vickers (HV). Na ZF, a amostra de referência apresentou valor médio de $215,00 \pm 9,35$ HV, enquanto as demais amostras mantiveram médias estáveis, independente da via ou do elemento adicionado ao fluxo, variando apenas dentro das margens de erro.

Assim como na análise da taxa de diluição, as barras de erro apresentadas nos ensaios de microdureza foram determinadas com base no desvio padrão entre as amostras de cada grupo. Para cada amostra, foram realizadas cinco indentações nas diferentes zonas analisadas (ZF, ZTA e MB) e a média dessas medições foi utilizada como valor representativo da amostra. A faixa de erro de cada grupo foi então calculada a partir da dispersão entre as médias individuais das três amostras que compõem cada conjunto. A única exceção é o grupo REF, que possui apenas uma amostra, para o qual a média e a dispersão foram calculadas diretamente a partir das cinco indentações realizadas em cada zona. Esses dados são apresentados de forma comparativa nas Figuras 15 (ZF) e 16 (ZTA e MB), permitindo a análise do efeito das diferentes concentrações e métodos de aplicação sobre a microdureza nas respectivas regiões.

Figura 15 – Comparativo das microdurezas HV obtidas de todas as amostras na ZF.



Fonte: Elaboração dos autores (2025).

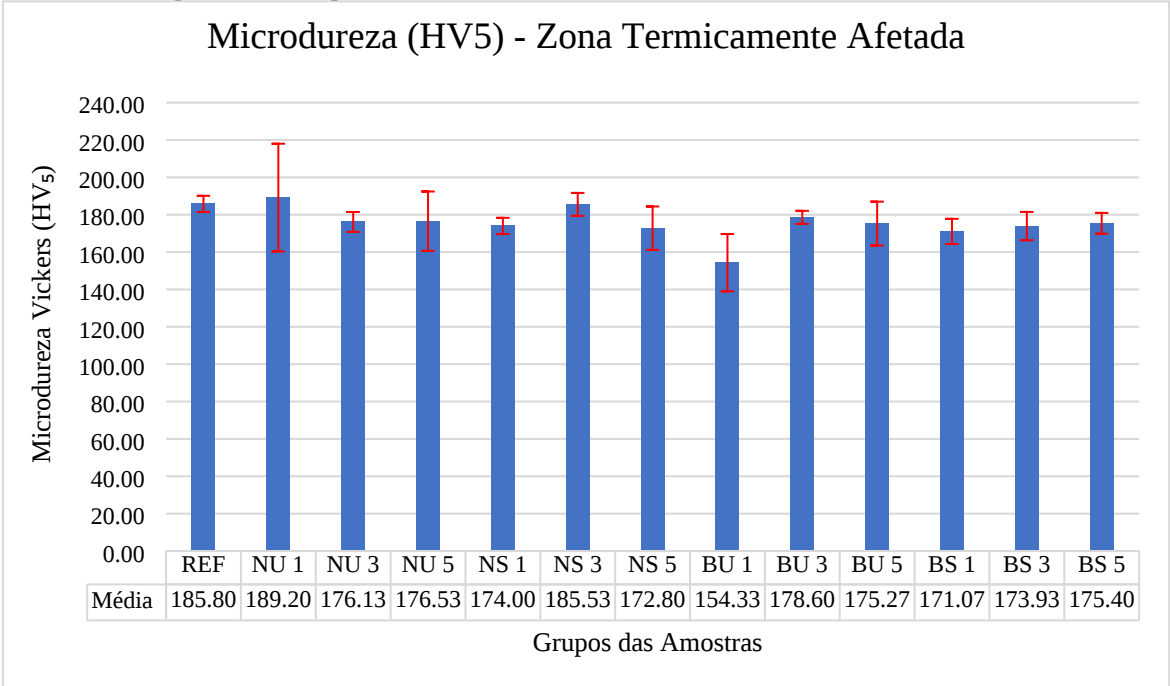
A comparação entre os elementos evidencia que a adição do fluxo com agente boretante se destacou como o endurecedor mais eficaz, alcançando valores mais próximos à referência, enquanto o Fe-NbC apresentou desempenho ligeiramente inferior. Observa-se que, independentemente da rota utilizada, ambos os elementos mantiveram níveis elevados de dureza, com resultados bastante semelhantes entre si.

As pequenas oscilações registradas entre alguns valores podem estar relacionadas a variações microestruturais locais, como regiões com maior fração de ferrita ou menor precipitação de carbeto, que influenciam diretamente a resposta mecânica do material. Essas diferenças pontuais refletem a sensibilidade da microdureza às transformações metalúrgicas que ocorrem durante a solidificação e ao longo da ZF.

Caso o procedimento fosse realizado por meio de um sistema automatizado, como soldagem mecanizada ou robótica, seria possível obter maior repetibilidade e uniformidade, reduzindo essas variações microestruturais e permitindo uma avaliação ainda mais precisa do potencial de endurecimento associado a cada elemento de liga.

Já para a ZTA, a Figura 18 evidencia uma estabilidade superior à observada na ZF. Como as fases identificadas nessa região foram homogêneas entre todas as amostras, os valores de microdureza obtidos são considerados representativos, uma vez que a ZTA corresponde à área adjacente à ZF e, portanto, foi apenas influenciada pelo aporte térmico do arco, sem receber adição direta de elementos provenientes do fluxo. Observa-se que os valores se mantêm próximos de 176,05 HV, indicando que o ciclo térmico imposto pela soldagem promoveu alterações microestruturais moderadas, suficientes para elevar a dureza em relação ao metal de base, mas sem gerar variações significativas entre as diferentes condições avaliadas.

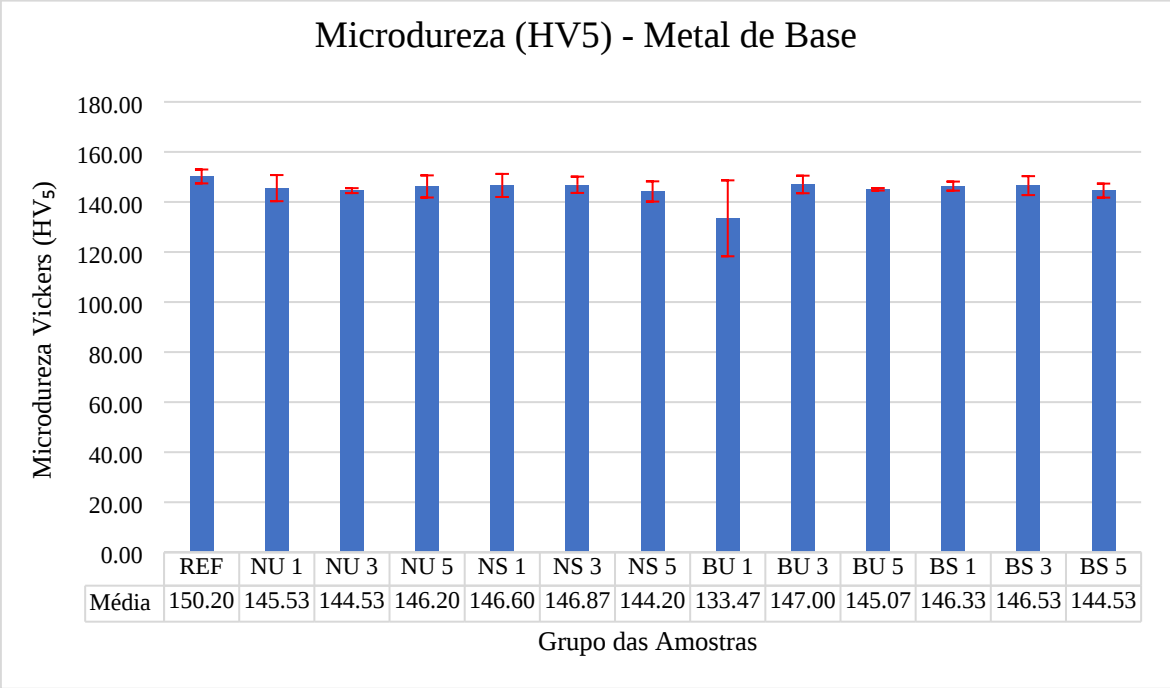
Figura 16 – Comparativo das microdurezas HV obtidas de todas as amostras na ZTA.



Fonte: Elaboração dos autores (2025).

A Figura 17 apresenta maior homogeneidade nos valores de indentações obtidas nas zonas, comportamento considerado válido independentemente da amostra, uma vez que a região analisada corresponde ao metal de base, uma zona não alterada que preserva suas características originais. O desvio acentuado observado no grupo BU 1 decorre de uma falha operacional que, consequentemente, impactou de forma significativa a margem de erro calculada.

Figura 17 – Comparativo das microdurezas HV obtidas de todas as amostras na MB.



Fonte: Elaboração dos autores (2025).

Na análise de microdureza realizada na região do metal de base, observou-se que os valores permaneceram dentro do padrão esperado para um aço de baixo carbono, uma vez que essa zona não sofre influência direta dos efeitos térmicos e metalúrgicos da soldagem. A leve variação registrada na amostra BU 1 pode ser atribuída a fatores operacionais. No

entanto, essas variações encontram-se dentro de limites aceitáveis, não representando alteração significativa nas propriedades do material.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos ao longo deste estudo demonstram que foi possível avaliar com sucesso a influência da adição de boro e de Fe-NbC nos revestimentos aplicados por soldagem com eletrodo revestido, permitindo compreender seus efeitos sobre aspectos macro e microestruturais. Apesar da presença de elementos químicos e da identificação de fases que, em princípio, poderiam promover um aumento significativo da microdureza, os resultados obtidos após ensaios mostraram-se limitados diante das concentrações adotadas. Contudo, é possível concluir que:

- A inspeção visual e macroscópica não identificou falhas, indicando boa execução da soldagem, e favorecendo integridade dos cordões.
- A taxa de diluição é afetada por múltiplos fatores, onde apresentou um comportamento inverso ao aumento da concentração para o caso do agente boretante e um comportamento de crescimento para o caso de Fe-NbC, porém com variações discretas.
- A soldagem seca mostrou maior estabilidade operacional, enquanto a úmida apresentou instabilidade do arco e maior dispersão dos resultados.
- As micrografias dos revestimentos com Fe-NbC indicam um direcionamento do crescimento dendrítico e aumento de NbC, enquanto para boro refinam a microestrutura e intensificam a formação e aglomeração de carbeto B_4C .
- As variações de microdureza na ZF foram moderadas; o boro apresentou maior capacidade de endurecimento e valores mais próximos da referência.
- Numa avaliação panorâmica, a taxa de diluição isolada não define a qualidade do revestimento; a combinação de macroestrutura, microestrutura e microdureza fornece diagnóstico mais completo.

Sugere-se, para trabalhos futuros, a continuidade desta linha de pesquisa com a aplicação de percentuais mais elevados dos elementos químicos adicionados, de modo a avaliar variações mais expressivas nos valores de microdureza. Além disso, recomenda-se a utilização de técnicas de análise microestrutural mais avançadas, como a microscopia eletrônica de varredura (MEV) por elétrons retroespalhados e mapeamento por EDS, além de uma difração de raios-x (DRX), visando identificar a localização dos elementos e as fases presentes com maior precisão e detalhamento.

5. REFERÊNCIAS

ASM INTERNATIONAL. Welding, Brazing, and Soldering – ASM Handbook. v. 6. Materials Park: ASM International, 2004.

BEZERRA, A. P.; SILVA FILHO, L. F. da; SILVA, G. P. da. Avaliação eletroquímica da resistência à corrosão de revestimentos de cromo duro obtidos de eletrólitos aditivados com acetato de sódio. Mossoró: Universidade Federal Rural do Semiárido, Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstreams/70efb10b-d303-43a9-a5c3-463066a85e46/download>. Acesso em: 02 out. 2025.

CAO, R. et al. Effects of boron on the microstructure and impact toughness of weathering steel weld metals and existing form of boron. *Materials Science and Engineering A*, v. 833, p. 142560, 2022.

CHO, L.; TSELIKOVA, A.; HOLTGREWE, K.; DE MOOR, E.; SCHMIDT, R.; FINDLEY, K. O. Critical assessment 42: acicular ferrite formation and its influence on weld metal and heat-affected zone properties of steels. *Materials Science and Technology*, v. 38, n. 17, p. 1425–1433, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2088163>

CUI, Z.-H.; WANG, B.-X. Effect of boron treatment on the microstructure and toughness of Ti-containing steel weld metals. *Revista de Metalurgia*, v. 58, n. 3, p. e223, 2022. DOI: 10.3989/revmetalm.223. Disponível em: <https://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/1542>. Acesso em: 15 out. 2025.

EROGLU, M. Boride coatings on steel using shielded metal arc welding electrode: microstructure and hardness. *Surface and Coatings Technology*, v. 203, n. 16, p. 2229–2235, 2009. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.02.010.

COLAÇO, F. H. G. Processo de soldagem com eletrodo revestido (SMAW). Jaraguá do Sul: IFSC, 2020. Disponível em: https://docente.ifsc.edu.br/fernandogruber/1-psol_tecnologo/Aula_6_-_Soldagem_Eletrodo_Revestido.pdf. Acesso em: 12 out. 2025.

KLINKENBERG, C.; HULKA, K.; BLECK, W. Niobium carbide precipitation in microalloyed steel. Düsseldorf: RWTH Aachen University, Institute for Ferrous Metallurgy, 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/287524342_Niobium_Carbide_Precipitation_in_Microalloyed_Steel. Acesso em: 28 set. 2025.

KORNOKAR, K. et al. Influence of heat input on microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded HSLA S500MC steel joints. *Metals*, v. 12, n. 4, p. 565, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12040565>.

KUMAR, R.; DIKSHIT, I.; VERMA, A. Experimental investigations and statistical modelling of dilution rate and area of penetration in submerged arc welding of SS316-L. *Materials Today: Proceedings*, v. 44, p. 3997–4003, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221478532037807X>. Acesso em: 9 nov. 2025.

LANCASTER, J. F. *Metallurgy of welding*. Abington: Abington Publishing, 1999. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/monograph/9781855734289/metallurgy-of-welding>. Acesso em: 30 nov. 2025.

LIMA, W. S. Construção de um protótipo mecanizado de baixo custo para processos de soldagem SMAW. Marabá: Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2019. Disponível em: <https://mecanica.unifesspa.edu.br/images/TCC/Welvis-Soares-Lima.pdf>. Acesso em: 10 out. 2025.

LIU, Y. et al. Effects of boron addition on microstructure and mechanical properties of B₄C/Al composites fabricated by pressureless infiltration. *Metals*, v. 15, n. 8, p. 919, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/15/8/919>.

OLIVEIRA, A. R. de. *Corrosão e tratamento de superfície*. Belém: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará; Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2012. Disponível em: https://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo_ctrl_proc_indust/tec_metal/corr_trat_superf/161012_corr_trat_superf.pdf. Acesso em: 15 out. 2025.

PEIXOTO, A. L. *Soldagem*. Belém: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará; Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2012. Disponível em: https://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo_ctrl_proc_indust/tec_metal/soldagem/161012_soldagem.pdf. Acesso em: 19 out. 2025.

POLLNOW, E. N. Revestimentos ricos em Nb aplicados sobre aço microligado por soldagem a arco. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande, FURG, 2021.

RECLA, T. A. R. Estudo da soldabilidade de materiais dissimilares pelo processo RSW utilizando um aço eletro galvanizado e o aço 22MnB5. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica, 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/527/1/dissertacao_recla_2016.pdf. Acesso em: 25 set. 2025.

ROVATTI, L.; LEMKE, J. N.; LECIS, N.; STEJSKAL, O.; VEDANI, M. Effect of dilution on microstructure and wear resistance of a Fe-based hardfacing alloy with a high amount of carbide-forming elements. *Conference Papers in Science*, v. 2015, p. 1-10, May 2015. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/276374>.

SELOTO, B. B. Análise comparativa das regiões de solda nos processos GW e SAWH em dutos de aços API 5L X70. Cornélio Procópio: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica). Disponível em: https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/7294/1/CP_COEME_2016_2_05.pdf. Acesso em: 19 out. 2025.

SILVA, W. M. da; MAIA, R. R.; OGATA, P. H.; CORREIA, F. C.; MORAIS, D. Avaliação do processo de soldagem por deposição de metal regulada em aplicações de revestimento. *Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada*, v. 9, n. 1, p. 16–35, jan./jun. 2022. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbfta/article/download/14368/8886>. Acesso em: 15 out. 2025.

VILLARET, S.; CHAPUIS, A.; BOYER, J.-C.; DESCHAMPS, A.; SAINDRENAN, J. A solidification model for the columnar to equiaxed transition in welding of a Cr-Mo ferritic stainless steel with Ti as inoculant. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 231, p. 387-395, 2016. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.01.010.

YUAN, S. et al. Evolution of microstructure and the influence of carbides on hardness properties in martensitic stainless steel 90Cr18MoV during heat treatment. *Metals*, v. 15, n. 9, 2025.

ZEEMANN, A. Diluição. Disponível em: <https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/metall/diluio.pdf>. Acesso em: 30 set. 2025.

ZHAO, S.; MIN, N.; LI, W. Formation of Widmanstätten ferrite and grain boundary ferrite in a hypereutectoid pearlitic steel. *Metals*, v. 12, n. 3, p. 493, 2022.