

Efeito do aporte térmico no revestimento de aço inoxidável super austenítico durante o processo GTAW em aços baixo carbono

The effect of electrochemical nickel coating (Watts bath) on the microstructure of super duplex stainless steels welded by the Nd:YAG pulsed laser process

El efecto del recubrimiento electrolítico de níquel (Baño de Watts) en la microestructura de aceros inoxidables super duplex soldados por el proceso de láser pulsado Nd:YAG

Guilherme Maximo Pereira ¹

Eli Jorge da Cruz Junior ²

Francisco Mateus Faria de Almeida Varasquim ³

Resumo: Os aços inoxidáveis super austeníticos possuem alta resistência mecânica e à corrosão, sendo amplamente utilizados na indústria de óleo e gás. No entanto, a soldagem pode causar alterações na microestrutura, impactando suas propriedades. Este trabalho avalia a influência do aporte térmico no revestimento de aço inoxidável super austenítico AISI 904L sobre aço baixo carbono ASTM A516 Grau 70, utilizando o processo GTAW. Foram realizadas análises macro e microestruturais, medições de microdureza e testes de corrosão para duas condições de soldagem. Os resultados demonstraram que o aporte térmico influencia significativamente as propriedades do revestimento, com diluição reduzida e aumento na microdureza. Além disso, a resistência à corrosão do revestimento foi superior à do substrato, aproximando-se das propriedades do AISI 904L.

Palavras-chave: Aços inoxidáveis superausteníticos. Aporte térmico. Revestimento. GTAW. Resistência à corrosão.

Abstract: Super austenitic stainless steels possess high mechanical strength and corrosion resistance, making them widely used in the oil and gas industry. However, welding can cause microstructural changes, impacting their properties. This study evaluates the influence of heat input on the super austenitic stainless steel AISI 904L cladding over low-carbon steel ASTM A516 Grade 70 using the GTAW process. Macro and microstructural analyses, microhardness measurements, and corrosion tests were performed for two welding conditions. Results showed that heat input significantly affects the cladding properties, with reduced dilution and increased microhardness. Furthermore, the corrosion resistance of the cladding surpassed that of the substrate, approaching the properties of AISI 904L.

Keywords: Super austenitic stainless steels. Heat input. Cladding. GTAW. Corrosion resistance.

¹ Graduando. IFSP Itapetininga. <https://orcid.org/0009-0004-9298-5480>. E-mail: g.maximo@aluno.ifsp.edu.br

² Doutor. IFSP Itapetininga. <https://orcid.org/0000-0002-1576-3532>. E-mail: dacruz.eli@ifsp.edu.br

³ Doutor. IFSP Itapetininga. <https://orcid.org/0000-0002-5130-3461> E-mail: franciscomateus@ifsp.edu.br



Resumen: Los aceros inoxidables super austeníticos poseen alta resistencia mecánica y a la corrosión, siendo ampliamente utilizados en la industria del petróleo y gas. Sin embargo, la soldadura puede causar alteraciones en la microestructura, afectando sus propiedades. Este trabajo evalúa la influencia del aporte térmico en el recubrimiento de acero inoxidable super austenítico AISI 904L sobre acero de bajo carbono ASTM A516 Grado 70, utilizando el proceso GTAW. Se realizaron análisis macro y microestructurales, mediciones de microdureza y pruebas de corrosión en dos condiciones de soldadura. Los resultados demostraron que el aporte térmico afecta significativamente las propiedades del recubrimiento, reduciendo la dilución y aumentando la microdureza. Además, la resistencia a la corrosión del recubrimiento superó la del sustrato, acercándose a las propiedades del AISI 904L.

Palabras clave: Aceros inoxidables super austeníticos. Aporte térmico. Recubrimiento. GTAW. Resistencia a la corrosión.

Submetido 15/01/2025

Aceito 10/03/2025

Publicado 02/04/2025

Considerações iniciais

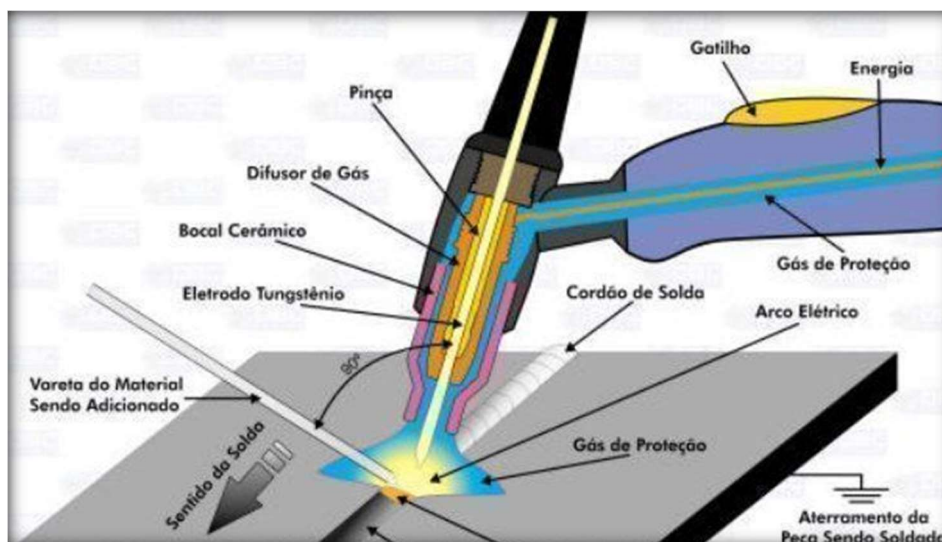
Setores industriais como química, papel e celulose, óleo e gás e offshore exigem materiais com alta resistência a corrosão, por exemplo aços inoxidáveis austeníticos (Saravanan *et al.*, 2017). Devido ao alto custo desses materiais, a sua utilização em grandes estruturas e equipamentos é cara e muitas vezes economicamente inviável. Uma alternativa é utilizar um aço carbono para a fabricação do equipamento, e revesti-lo com uma fina camada de aço inoxidável, conhecido como *cladding* (Kumar *et al.*, 2022).

O processo de revestimento *cladding* é uma das melhores maneiras de melhorar as propriedades superficiais de componentes mecânicos, por meio da deposição de um material de resistência superior sob um material base ((Murkute, 2019; Aslam, 2022)

Soldagens por arco elétrico, como o processo GTAW (Gas Tungsten Arc Welding, ou soldagem a arco com gás de proteção), demonstrado na Figura 1, têm sido amplamente utilizadas para o revestimento com aços inoxidáveis, tendo como uma das principais vantagens o baixo custo dos equipamentos (Li, 2020; Prakash, 2022). O processo GTAW é um dos mais utilizados pela indústria de óleo e gás, por sua capacidade de gerar camadas de alta qualidade e livres de defeitos (Hou *et al.*, 2021).

A Figura 1 ilustra os principais componentes do processo GTAW. Este método utiliza um eletrodo de tungstênio não consumível, que gera o arco elétrico necessário para fundir o material de adição e formar o cordão de solda. O gás de proteção, geralmente argônio ou hélio, é liberado através de um difusor no bocal cerâmico, protegendo a zona de soldagem contra contaminações atmosféricas, como oxigênio e nitrogênio. A adição de material é realizada manualmente, por meio de uma vareta, enquanto a pinça e outros componentes auxiliam na condução elétrica e na estabilidade do arco. Este processo é amplamente reconhecido por sua precisão e qualidade, sendo indicado para aplicações que exigem soldas com alta integridade estrutural.

Figura 1 – Representação solda GTAW



Fonte: DBC Oxigênio

Os aços inoxidáveis representam uma importante classe de materiais de engenharia, e são conhecidos por sua boa resistência a corrosão devido ao seu alto teor de cromo. Dentre os aços inoxidáveis, um dos mais utilizados são os aços inoxidáveis austeníticos, que contêm uma quantidade significativa de cromo e níquel, ou manganês, suficiente para estabilizar a microestrutura de austenita (Kumar, 2022).

Uma nova geração de aços inoxidáveis austeníticos, com resistência a corrosão superiores, conhecidos como aços inoxidáveis superausteníticos tornaram-se um importante ramo no desenvolvimento de aços de alto desempenho. Eles têm substituído os aços inoxidáveis austeníticos convencionais, principalmente em aplicações offshore, indústria de óleo e gás e química, devido à sua combinação de resistência e desempenho à corrosão (Matias *et al.*, 2023).

Para que o processo de revestimento com aços inoxidáveis superausteníticos seja bem-sucedido, além das complexidades tecnológicas associadas ao processo GTAW (anteriormente mencionadas), é necessário considerar as particularidades relacionadas ao material. Uma das maiores limitações dos aços inoxidáveis austeníticos ocorre na faixa de temperatura de 500 a 800 °C, onde pode haver a precipitação de carbonetos de cromo, resultando em um fenômeno conhecido como sensitização. A sensitização consiste no empobrecimento de cromo nas regiões

adjacentes aos carbonetos de cromo precipitados, o que pode levar à corrosão intergranular (Li *et al.*, 2022).

A aplicação do revestimento de aços inoxidáveis superausteníticos por meio do processo GTAW demanda um controle dos parâmetros de soldagem bem como das temperaturas envolvidas no processo. Uma das formas de controlar-se os parâmetros de deposição/soldagem é controlando o aporte térmico. O aporte térmico pode ser calculado utilizando a relação apresentada na Equação 1 (Yousefieh *et al.*, 2011).

$$AT = \eta \times \frac{V \times I}{v_s} \quad \text{Equação 1}$$

Onde V é a tensão do arco, I é a corrente de soldagem, η é a eficiência do arco e v_s é a velocidade de avanço. A eficiência do arco é a proporção de calor que é transferida a peça.

Considerando que um estudo mais detalhado possibilitará a definição de parâmetros de soldagem/deposição, este trabalho tem por objetivo avaliar a influência do aporte térmico no revestimento de aço inoxidáveis superaustenítico (AISI 904L) sobre aço baixo carbono (ASTM A516 Grau 70), por meio da macro, microestrutura e microdureza de forma a alcançar um revestimento com propriedades adequadas e livre de defeitos, ampliando a aplicação do processo, principalmente na indústria óleo e gás.

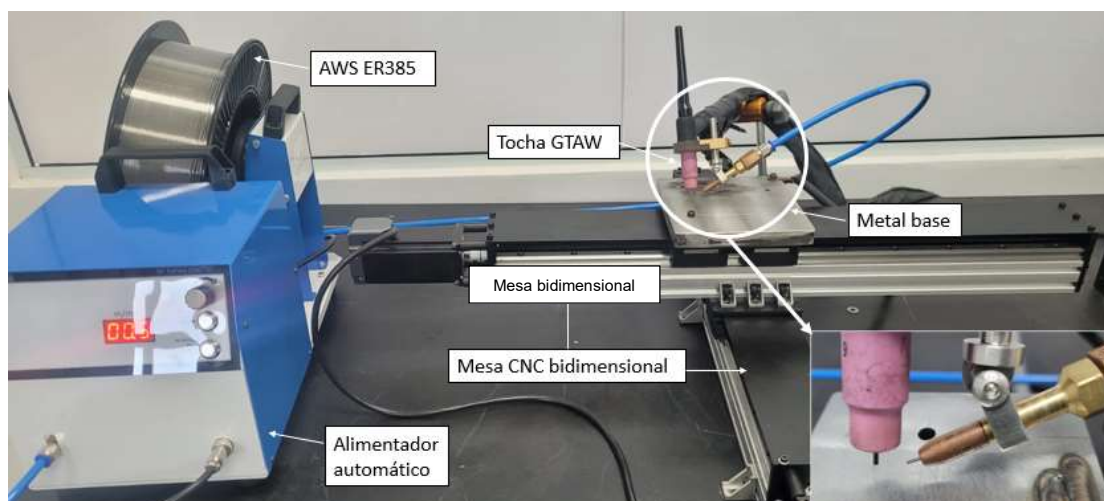
Metodologia

Utilizou-se como metal base chapas de aço carbono ASTM A516 Grau 70 nas dimensões 150 x 150 mm e 3/4" de espessura, um aço baixo carbono bastante aplicado na produção de vasos de pressão. Para o revestimento, o consumível AWS ER385 (AISI 904L) foi utilizado. A escolha da baixa quantidade de carbono no consumível, visa prevenir a formação de carbonetos de cromo que podem levar a sensitização da camada revestida.

Para as deposições foi desenvolvido um sistema composto de uma inversora GTAW (Balmer MB 180 TIGP), uma mesa bidimensional (Tekno mecatrônica) e um alimentador de arames automático (IMC Soldagem). A trajetória de execução do revestimento, a velocidade

de soldagem/deposição e a velocidade de alimentação do arame foram controladas por meio de um Arduino. A Figura 2 apresenta o sistema de revestimento desenvolvido.

Figura 2 – Aparato experimental



Fonte: Próprio autor

Foi utilizado eletrodo de tório tungstênio AWS EW7H2 com 1.6 mm de diâmetro, ângulo de 90°, com distância da chapa de 1.5 mm. O arame (metal de adição) foi o AWS ER385 (AISI 904L) e como gás de proteção argônio, com vazão de 15 l/min.

Inicialmente fez-se um cordão único de deposição onde foram avaliadas 2 condições, variando as velocidades de soldagem em 300 e 500 mm/min. A velocidade de alimentação do arame para ambas as condições foi de 0,5 m/min. Os demais parâmetros (corrente e tensão) foram mantidos constantes. A Tabela 1 apresenta os parâmetros de deposição utilizados e o aporte térmico calculado.

Tabela 1 – Condições de revestimento

Amostras	Tensão de Soldagem [V]	Corrente de Soldagem [A]	Velocidade de Soldagem [mm/min]	Aporte Térmico [J/mm]
----------	------------------------	--------------------------	---------------------------------	-----------------------

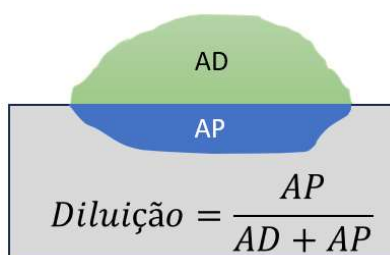
DP500	30	180	500	530
DP300	30	180	300	885

Fonte: Próprio autor

Após a deposição, os corpos de prova foram cortados transversalmente e embutidos em resina epóxi. Posteriormente, as amostras foram submetidas aos processos de lixamento e polimento, conforme os procedimentos padrões para análise microscópica. A revelação da macro e microestrutura foi realizada utilizando Nital a 2%. A caracterização macro e microestrutural ocorreu por meio de microscopia óptica, com o uso de um microscópio Zeiss AxioLab.A1 acoplado a uma câmera digital ZEISS modelo AxioCam ERc 5s, sincronizado a um analisador de imagens AxioVision Rel. 4.8, além de um estereomicroscópio ZEISS Stemi DV4. A diluição dos revestimentos foi calculada com base nas macrografias obtidas.

A diluição pode ser definida como a relação percentual entre a área depositada (AD) e a soma desta área com a área penetrada (AP), conforme demonstrado na Figura 3 (GAO *at al.*, 2024). Os cálculos de diluição foram realizados utilizando o software ImageJ.

Figura 3 – Diagrama esquemático da taxa de diluição



Fonte: Próprio autor

Os testes de microdureza Vickers foram realizados no metal base, na zona termicamente afetada (ZTA) e na camada depositada utilizando um durômetro EMCO TEST Duravision com uma carga de 1 gf. De posse dos resultados referentes as amostras DP300 e DP500, foi realizado mais um ensaio de deposição (condição DP300), porém com 3 cordões e uma sobreposição de 40% entre os cordões.

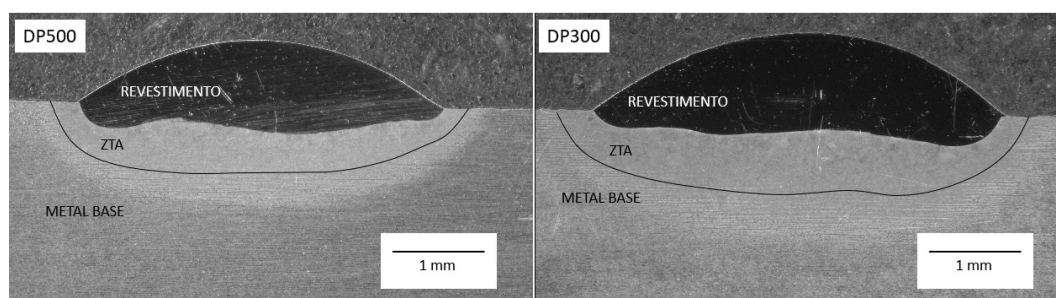
Foram realizadas análises macro e microestruturais das amostras revestidas. A preparação da superfície revestida incluiu procedimentos específicos para o teste de corrosão, cujos resultados foram comparados com os de uma chapa de aço inoxidável AISI 904L. Os testes de corrosão foram conduzidos de acordo com a norma ASTM G1, utilizando uma área de 1 cm² contendo uma solda, exposta a uma solução eletrolítica de NaCl a 3,5% em um ambiente controlado.

Para a avaliação das propriedades eletroquímicas, empregou-se um eletrodo de referência Ag/AgCl (3 M, KCl) e um eletrodo auxiliar de platina (Pt), configurados com o eletrodo de trabalho. Os ensaios eletroquímicos foram realizados à temperatura ambiente, utilizando o potenciostato AMETEK VersaSTAT 4, com uma taxa de varredura de 1 mV/s para todas as amostras. Os dados obtidos foram analisados com o software Origin, permitindo a interpretação detalhada dos resultados.

Análise de dados e resultados

As macrografias para as amostras DP500 e DP300 são apresentadas na Figura 4.

Figura 4 – Macrografias para as amostras DP500 e DP300



Fonte: Próprio autor

Para ambas as condições é possível observar 3 regiões distintas: metal base, ZTA e revestimento. O aumento no aporte térmico impactou na extensão da ZTA, onde para a amostra DP300, que resultou no maior aporte térmico, a ZTA foi maior.

A quantidade de material depositado foi maior na condição DP300, pois, nesta condição, a velocidade de soldagem foi menor. Esse comportamento ocorre porque a deposição de material está diretamente relacionada à velocidade de soldagem: velocidades menores permitem maior alimentação de material, resultando em um depósito mais completo e uniforme.

Ainda pelas macrografias, foi possível calcular as taxas de diluição dos revestimentos, sendo as áreas utilizadas no cálculo extraídas diretamente da Figura 3, na qual a AP (zona termicamente afetada - ZTA) foi identificada como a região mais clara, delimitada por uma linha preta, e a AD (revestimento) correspondeu à área mais escura, em formato de gota. A partir dessas medições, as taxas de diluição para as condições DP500 e DP300 foram calculadas, resultando em aproximadamente 31% e 28%, respectivamente. Esses valores evidenciam a influência do aporte térmico no processo, com menores velocidades de soldagem resultando em menores taxas de diluição.

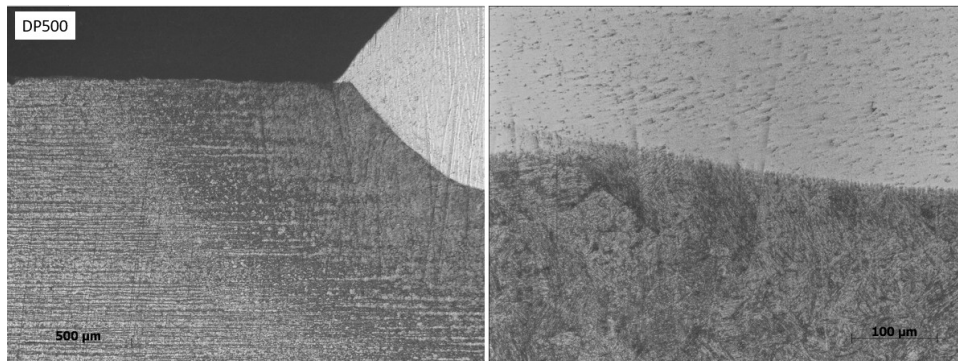
A diluição é influenciada por fatores como a penetração do revestimento, a largura e o reforço. As tensões e correntes de soldagem foram idênticas para as amostras DP500 e DP300, com a única variação ocorrendo nas velocidades de soldagem, que foram menores para DP300 (300 mm/min). A penetração para ambas as condições foi bastante similar; no entanto, a menor velocidade de soldagem na condição DP300 resultou em uma maior quantidade de material depositado, formando uma camada de revestimento mais espessa e volumosa. Essa característica contribuiu para a redução na taxa de diluição.

Para um revestimento *cladding* eficaz, é importante manter a diluição baixa, pois isso melhora tanto o reforço quanto a largura do revestimento, resultando em uma área de cobertura mais ampla no substrato. Além disso, uma baixa diluição garante que os componentes essenciais necessários nas camadas do revestimento permaneçam intactos.

As micrografias para as amostras DP500 e DP300 são apresentadas na Figura 5 e Figura 6 respectivamente. Conforme observado nas macrografias, o aporte térmico afetou a extensão da ZTA, porém as microestruturas resultantes foram similares. A ZTA refere-se à área do material base que não se fundiu, mas que passou por alterações em sua microestrutura e propriedades devido ao calor gerado durante o processo de soldagem. Em casos de maior entrada térmica, a região afetada tende a ser maior. Para ambas as condições é possível observar

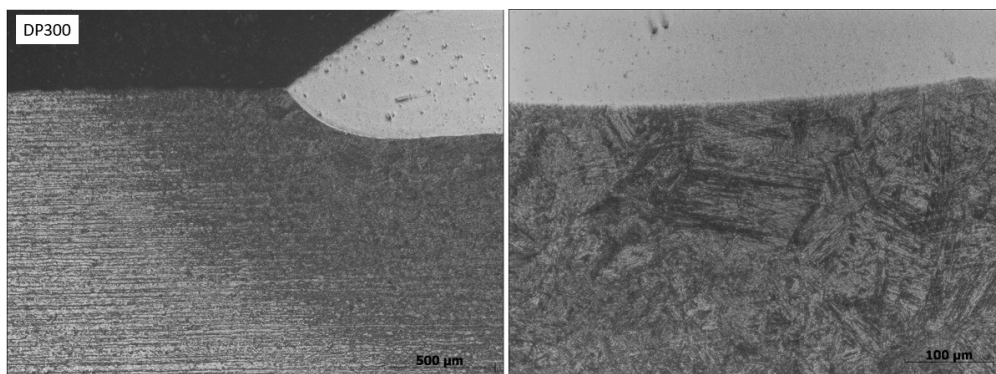
a formação de bainita na ZTA, resultante das condições de resfriamento (Murkute *et al.*, 2019; Aslam *et al.*, 2022).

Figura 5 – Micrografia da amostra DP500



Fonte: Próprio autor

Figura 6 – Micrografia da amostra DP300

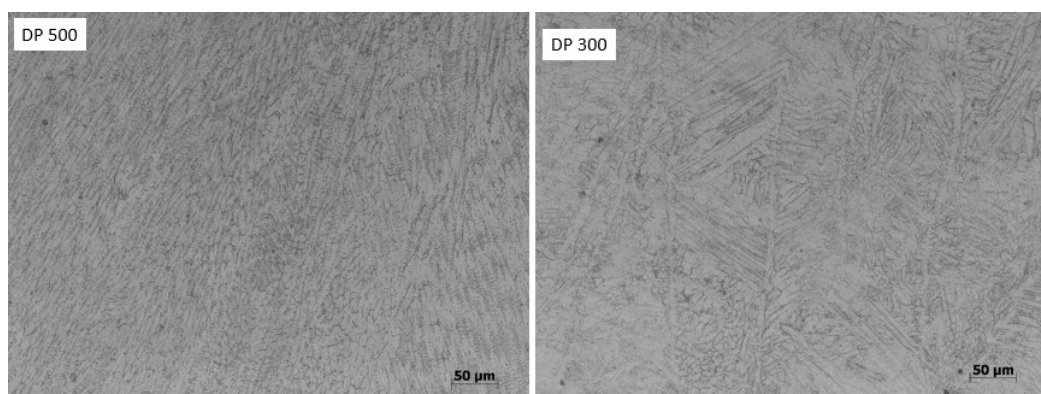


Fonte: Próprio autor

As micrografias das camadas revestidas para as amostras DP500 e DP300 são apresentadas na Figura 7. Para a amostra DP500 observou-se uma microestrutura composta por uma matriz austenítica com δ -ferrita nos contornos de grãos. Já para a condição DP300, resultante do aporte térmico maior, observou-se uma microestrutura composta de austenitas alotriomórfas de contorno de grãos, austenita de Widmanstätten e austenita intragranular.

A formação de austenita alotriomórfica de contorno de grãos e de austenita de Widmanstätten ocorre a altas temperaturas, enquanto a austenita intragranular se forma a temperaturas mais baixas (Cruz Junior *et al.*, 2023). O aporte térmico na amostra DP300 facilitou a formação de austenita alotriomórfica de contorno de grão e austenita de Widmanstätten, levando a uma alteração na microestrutura da camada de revestimento em comparação com a DP500.

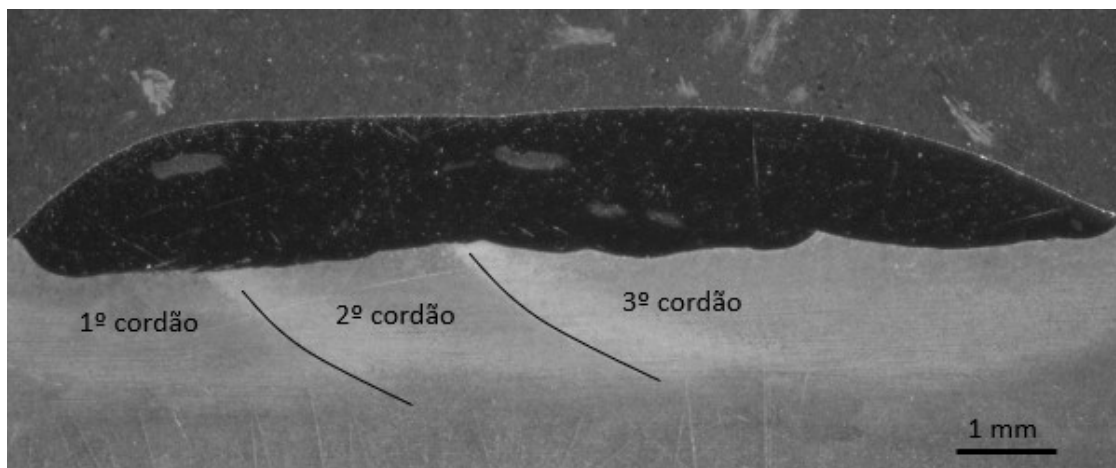
Figura 7 – Micrografias das camadas revestidas



Fonte: Próprio autor

A macroestrutura do revestimento com três cordões, realizado na condição DP300, é apresentada na Figura 8. O valor de diluição calculado foi de 25%, representando uma leve redução em comparação com a amostra de cordão único na mesma condição, que apresentou um valor de 28%. Essa diminuição na diluição pode ser atribuída ao aumento da espessura do revestimento, causado pela sobreposição dos cordões. Com isso, a relação entre a penetração e a espessura do revestimento foi reduzida, contribuindo para a menor diluição. Como mencionado anteriormente, menores taxas de diluição são benéficas para os revestimentos. Além disso, nenhuma imperfeição foi identificada na camada de revestimento, como rachaduras, inclusões ou porosidades.

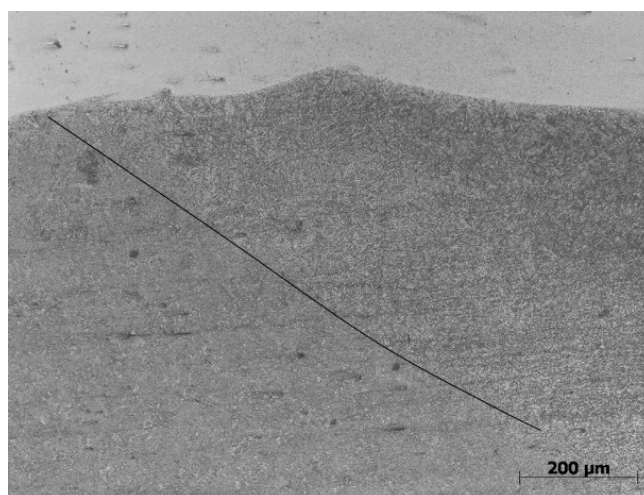
Figura 8 – Macroestrutura do revestimento



Fonte: Próprio autor

A Figura 9 apresenta a micrografia para o revestimento. A microestrutura da ZTA foi similar àquelas observadas para as condições DP500 e DP300. Ainda é possível observar a transição entre o 2º e 3º cordão do revestimento, conforme linha adicionada na micrografia.

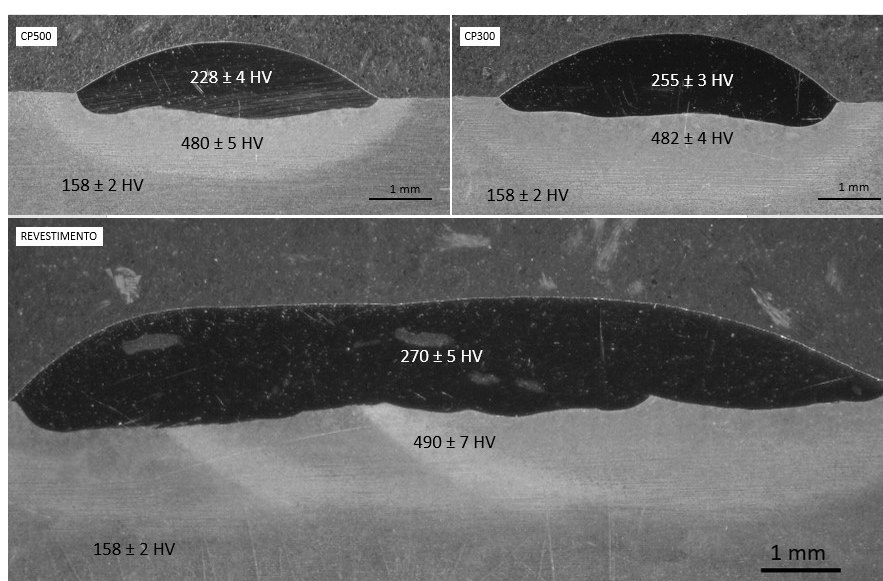
Figura 9 – Transição entre 2º e 3º cordão da zona termicamente afetada



Fonte: Próprio autor

A Figura 10 apresenta as micrografias com os valores médios de microdureza para cada uma das regiões de todas as amostras ensaiadas. Não houveram variações significativas nas microdurezas das ZTAs. A microdureza da ZTA foi superior à do MB, visto que houve formação de bainita nessa região. O aporte térmico afetou a microdureza dos revestimentos, onde com o aumento do aporte térmico aumentou-se as microdurezas.

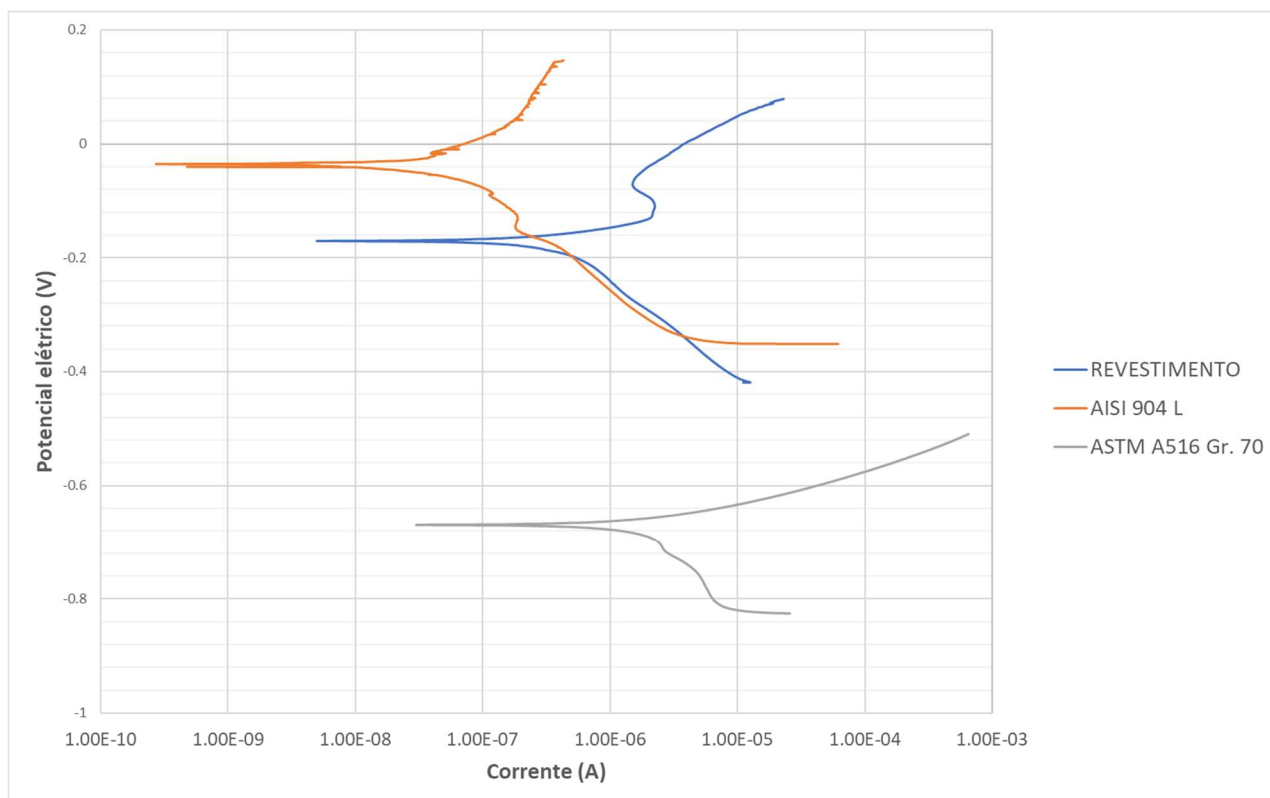
Figura 10 – Macroestrutura com valores das microdurezas



Fonte: Próprio autor

A Figura 11 ilustra a curva de polarização de Tafel para a camada de revestimento (com três esferas de revestimento), o metal base (ASTM A516 Gr. 70) e uma chapa laminada de AISI 904L. A resistência à corrosão aprimorada é indicada por valores mais altos de potencial de corrosão (resultando em um deslocamento para cima da curva de Tafel) e valores mais baixos de corrente de corrosão (resultando em um deslocamento para a esquerda da curva de Tafel) (Wang *et al.*, 2023).

Figura 11 – Curva de polarização de Taffel



Fonte: Próprio autor

Apesar de se aproximar da resistência à corrosão da chapa de AISI 904L, a camada de revestimento exibiu valores de potencial de corrosão e corrente mais baixos. O revestimento melhorou significativamente a resistência à corrosão em comparação com o metal base, alcançando o objetivo do revestimento em aço inoxidável superaustenítico sobre aço baixo carbono.

Considerações finais

Com base nos resultados podemos delinear as seguintes conclusões.

- Para todas as condições, houve uma boa aderência do revestimento ao metal base, mostrando a viabilidade do processo e validando o aparato experimental.
- O aporte teve influência na diluição das camadas de revestimento. Um aporte térmico maior resultou em uma diminuição na diluição de 31% (DP500) para

28% (DP300). Velocidades de soldagem mais lentas levaram a um maior reforço e a uma menor relação penetração/reforço. Valores de diluição mais baixos são preferíveis para aplicações de revestimento.

- Para todas as condições houve formação de bainita na ZTA, resultado em uma microdureza maior.
- O aporte térmico afetou a microdureza dos revestimentos, onde com o aumento do aporte térmico aumentou-se as microdurezas.
- A resistência à corrosão da camada de revestimento se aproximou da do aço AISI 904L. Embora ligeiramente inferior à do AISI 904L, apresentou um aumento significativo em comparação com o metal base, alcançando o objetivo de revestimento de aço inoxidável superaustenítico sobre aço de baixo carbono.

Referências

ASLAM, M.; SAHOO, C. K. Numerical and experimental investigation for the cladding of AISI 304 stainless steel on mild steel substrate using Gas Metal Arc Welding. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 37, p. 378–387, maio 2022.

CRUZ JUNIOR, E. J. da; *et al.* Effects of Base Metal Preheating on the Microstructure, Mechanical Properties, and Corrosion Resistance of UNS S32750 SDSS Pulsed Nd:YAG Laser Welding. **Coatings**, v. 13, p. 1930, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/coatings13111930>.

FA, H.; *et al.* Long-term oxidation behaviour and thermal stability of heat-resistant stainless steel claddings deposited on AISI 316 stainless steel by the GTAW process. **Surface & Coatings Technology**, v. 424, p. 127605–127605, 1 out. 2021.

GAO, S.; *et al.* Optimization of Laser Cladding Parameters for High-Entropy Alloy-Reinforced 316L Stainless-Steel via Grey Relational Analysis. **Coatings**, v. 14, p. 1103, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/coatings14091103>.

HADEN, C. V.; *et al.* Wire and arc additive manufactured steel: Tensile and wear properties. **Additive Manufacturing**, v. 16, p. 115–123, ago. 2017.

HOU, Z.; *et al.* Microstructure and Mechanical Performances of Stainless Steel Cladding by Twin-Electrode GTAW. **Materials Transactions**, v. 62, n. 7, p. 995–1000, 1 jul. 2021.

JOÃO, V. S. M.; *et al.* Microstructure and corrosion properties of the AISI 904L weld cladding obtained by the electro slag process. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 15, p. 5151–5164, 1 nov. 2021.

KANEMARU, S.; *et al.* Study for TIG–MIG hybrid welding process. **Welding in the World**, v. 58, n. 1, p. 11–18, 22 ago. 2013.

KUMAR, M.; SINGH, J.; UPPAL, A. S. Improvement in corrosion resistance of AISI 316L stainless steel weld cladding using GTA remelting technique. **Materials Today: Proceedings**, v. 65, p. 3224–3228, 1 jan. 2022.

KUMAR, DAS A. Recent developments in TIG torch assisted coating on austenitic stainless steel: A critical review. **Materials Today: Proceedings**, v. 57, p. 1846–1851, 2022.

LI, C.; *et al.* Microstructures and mechanical properties of stainless steel clad plate joint with diverse filler metals. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 2, p. 2522–2534, 1 mar. 2020.

LI, W.; *et al.* Promotion of pitting corrosion at hydrogen-enriched α/γ phase boundaries in austenitic stainless steel weld joints. **Acta Materialia**, v. 227, p. 117728–117728, 1 abr. 2022.

MATIAS, J. V. S.; *et al.* Behavior of a superaustenitic stainless steel weld cladding deposited by the gas metal arc welding process. **Materials Today Communications**, v. 34, p. 104978, 1 mar. 2023.

MURKUTE, P.; *et al.* Production of corrosion-resistant 316L stainless steel clads on carbon steel using powder bed fusion-selective laser melting. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 273, p. 116243, nov. 2019.

PRAKASH, P. A.; *et al.* Characterization and analysis of TIG welded stainless steel 304 alloy plates using radiography and destructive testing techniques. **Materials Today: Proceedings**, v. 51, p. 935–938, 1 jan. 2022.

RODRIGO STOHLER GONZAGA; *et al.* Microstructural characterization of the transition zone between a C–Mn steel pipe and a 70%Ni30%Cu alloy cladding welded by HW-GTAW. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 192, p. 104433–104433, 1 ago. 2021.

SARAVANAN, S.; *et al.* Pulsed Nd: YAG laser welding and subsequent post-weld heat treatment on super duplex stainless steel. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 25, p. 284–289, jan. 2017.

UNGETHÜM, T.; *et al.* Analysis of metal transfer and weld geometry in hot-wire GTAW with indirect resistive heating. **Welding in the World**, v. 64, n. 12, p. 2109–2117, 3 set. 2020.

WANG, Q.; *et al.* Investigation of microstructure evolution, mechanical and corrosion properties of SAF 2507 super duplex stainless steel joints by keyhole plasma arc welding. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 22, p. 355–374, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.107>.

YOUSEFIEH, M.; *et al.* Influence of Heat Input in Pulsed Current GTAW Process on Microstructure and Corrosion Resistance of Duplex Stainless Steel Welds. **Journal of Iron and Steel Research International**, v. 18, n. 9, p. 65–69, set. 2011.