

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

FABRÍCIO ALONSO LÁZARO JÚNIOR

**APLICAÇÃO DE LASER PULSADO Nd:YAG NA SOLDAGEM AUTÓGENA
DISSIMILAR ENTRE OS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICO AISI 316L E
DUPLEX UNS S32205**

Ilha Solteira - SP
2025

FABRÍCIO ALONSO LÁZARO JÚNIOR

**APLICAÇÃO DE LASER PULSADO Nd:YAG NA SOLDAGEM
AUTÓGENA DISSIMILAR ENTRE OS AÇOS INOXIDÁVEIS
AUSTENÍTICO AISI 316L E DUPLEX
UNS S32205**

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado à Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira – UNESP como parte dos
requisitos para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Mecânica.

Nome do orientador

Vicente Afonso Ventrella

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

L431a Lázaro Júnior, Fabrício Alonso.
Aplicação de laser pulsado Nd:YAG na soldagem autógena dissimilar entre os
aços inoxidáveis austenítico AISI 316L e duplex UNS S32205 / Fabrício Alonso
Lázaro Júnior. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
43 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2025

Orientador: Vicente Afonso Ventrella
Inclui bibliografia

1. Soldagem a laser pulsado Nd:YAG. 2. Aço inoxidável duplex UNS S32205.
3. Aço inoxidável austenítico AISI 316L. 4. Microestrutura (Ferrita/Austenita).

Esta folha destina-se à inserção da **FOLHA DE APROVAÇÃO** que o autor receberá após a apresentação em público.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "Júlio de Mesquita Filho"¹ .
FACULDADE DE ENGENHARIA – CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ATA DA DEFESA TRABALHO DE GRADUAÇÃO

TÍTULO: Aplicação de Laser Pulsado Nd:YAG na Soldagem Autógena
Dissimilar entre os aços inoxidáveis austenítico AISI 316L e
duplex UNS S32205

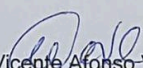
ALUNO: Fabrício Alonso Lázaro Júnior

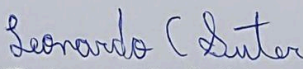
ORIENTADOR: Prof. Dr. Vicente Afonso Ventrella

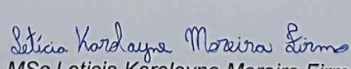
Aprovado (X) - Reprovado () pela Comissão Examinadora

Nota: 9,0 (nove)

Comissão Examinadora:


Prof. Dr. Vicente Afonso Ventrella
Presidente (Orientador)


MSc. Leonardo Camilo Suter


: MSc Leticia Karolayne Moreira Firmo

Ilha Solteira, 19 de novembro de 2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por todo o apoio e amor. Agradeço também aos amigos feitos ao longo deste curso, pela convivência e incentivo. Expresso minha gratidão ao meu orientador, pela paciência e pelos ensinamentos transmitidos. Agradeço, ainda, ao pessoal do departamento, por todo o auxílio prestado durante o desenvolvimento deste projeto.

“Não foi como eu imaginava, mas muito mais transformador do que eu poderia sonhar.”

RESUMO

Com a constante evolução da indústria de petróleo e gás, a necessidade de aprimoramento dos processos tecnológicos de manufatura ganhou destaque no mercado. Os aços inoxidáveis duplex e superduplex despertaram grande interesse econômico e tecnológico devido à sua microestrutura composta por 50% ferrita e 50% austenita, que proporcionou uma combinação equilibrada de resistência à corrosão e resistência mecânica. No entanto, a soldagem a laser desses materiais provocou um desbalanceamento microestrutural no metal de solda, favorecendo a formação excessiva de ferrita e comprometendo suas propriedades mecânicas e resistência à corrosão. Este estudo teve como objetivo aumentar a proporção de austenita no metal base por meio da soldagem dissimilar a laser Nd:YAG, na condição autógena, entre os aços inoxidáveis duplex UNS S32205 e austenítico AISI 316L. O aço AISI 316L, rico em níquel, contribuiu para a estabilização da fase austenítica. A soldagem foi realizada em juntas de topo, utilizando chapas com dimensões de 2,0 x 50 x 60 mm (A x L x C), variando a sobreposição dos cordões de solda entre 50% e 90%. Os parâmetros do laser foram definidos como energia de pulso de 12 J, potência de pico de 2 kW, largura temporal de 6 ms e frequência variando de 6 Hz a 12 Hz. O gás de proteção empregado foi argônio puro, com vazão de 15 L/min. As micrografias foram obtidas para todas as condições de sobreposição, analisando a integridade do cordão de solda e a penetração do metal de solda. Foram realizados ensaios de tração para determinar as regiões de fratura, identificando se a ruptura ocorreu no metal base ou no metal de solda. As análises microestruturais foram conduzidas por microscopia óptica (MO) e os resultados foram processados no software ImageJ para quantificar o balanço volumétrico entre ferrita e austenita. Por meio deste estudo, demonstrou-se a viabilidade da soldagem a laser para a união entre tubos de aço duplex UNS S32205 e flanges de aço inoxidável austenítico AISI 316L, contribuindo para o desenvolvimento de processos mais eficientes na indústria de petróleo e gás.

Palavras-chave: SOLDAGEM A LASER PULSADO Nd:YAG; AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32205; AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 316L; MICROESTRUTURA (FERRITA/AUSTENITA).

ABSTRACT

With the constant evolution of the oil and gas industry, the need for improvement of manufacturing technological processes has gained significant relevance in the market. Duplex and superduplex stainless steels have attracted great economic and technological interest due to their microstructure composed of 50% ferrite and 50% austenite, which provides a balanced combination of corrosion resistance and mechanical strength. However, laser welding of these materials has caused a microstructural imbalance in the weld metal, favoring excessive ferrite formation and compromising its mechanical properties and corrosion resistance. This study aimed to increase the proportion of austenite in the base metal through autogenous dissimilar laser welding using Nd:YAG, joining duplex stainless steel UNS S32205 and austenitic stainless steel AISI 316L. The AISI 316L steel, rich in nickel, contributed to the stabilization of the austenitic phase. Welding was performed on butt joints using plates with dimensions of $2.0 \times 50 \times 60$ mm (T $\times$ W $\times$ L), varying the overlap of the weld beads between 50% and 90%. The laser parameters were defined as pulse energy of 12 J, peak power of 2 kW, pulse width of 6 ms, and frequency ranging from 6 Hz to 12 Hz. Pure argon gas was used as shielding gas, with a flow rate of 15 L/min. Micrographs were obtained for all overlap conditions, analyzing the weld bead integrity and penetration. Tensile tests were carried out to determine the fracture regions, identifying whether the rupture occurred in the base metal or the weld metal. Microstructural analyses were performed by optical microscopy (OM), and the results were processed using the ImageJ software to quantify the volumetric balance between ferrite and austenite. This study demonstrated the feasibility of laser welding for joining duplex steel UNS S32205 and austenitic stainless steel AISI 316L flanges, contributing to the development of more efficient processes in the oil and gas industry.

Keywords: PULSED Nd:YAG LASER WELDING; DUPLEX STAINLESS STEEL UNS S32205; AUSTENITIC STAINLESS STEEL AISI 316L; MICROSTRUCTURE (FERRITE/AUSTENITE).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Guilhotina mecânica	23
Figura 2	- Amostras na retífica	24
Figura 3	- Aparato de soldagem montado	25
Figura 4	- Amostra posicionada na máquina de solda	25
Figura 5	- Amostra durante a soldagem	25
Figura 6	- Cilindro de argônio com manômetro	26
Figura 7	- Amostra já soldada	26
Figura 8	- Máquina de corte	27
Figura 9	- Embutidoras do laboratório	28
Figura 10	- Amostra embutida	28
Figura 11	- Suporte para lixas úmido	29
Figura 12	- Politriz do laboratório	29
Figura 13	- Microscópio para macrografia do laboratório	30
Figura 14	- Microscópio para micrografia do laboratório	31
Figura 15	- Amostra 01 com falha por desalinhamento	32
Figura 16	- Amostra 01 com falha por vazio no cordão de solda	33
Figura 17	- Amostra 01 (resultado final)	34
Figura 18	- Amostra 01 – detalhe	34
Figura 19	- Amostra 02	35
Figura 20	- Amostra 02 – detalhe	35
Figura 21	- Amostra 03	36
Figura 22	- Amostra 03 – detalhe	36
Figura 23	- Amostra 04	37
Figura 24	- Amostra 04 – detalhe	37
Figura 25	- Imagem sob análise no software ImageJ	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Parâmetros de soldagem	24
Tabela 2	- Análise da fração de austenita na amostra 01	39
Tabela 3	- Análise da fração de austenita na amostra 02	39
Tabela 4	- Análise da fração de austenita na amostra 03	39
Tabela 5	- Análise da fração de austenita na amostra 04	39

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AISI	American Iron and Steel Institute (Instituto Americano de Ferro e Aço)
IA	Inteligencia Artificial
MO	Microscopia Óptica
Nd:YAG	Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet (Granada de Ítrio e Alumínio dopada com Neodímio)
UNS	Unified Numbering System (Sistema Unificado de Numeração para ligas metálicas)
ZTA	Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

HCl	Ácido Clorídrico
Al	Alumínio
γ	Austenita – fase austenítica da microestrutura
NH_4HF_2	Bifluoreto de Amônio
α	Ferrita – fase ferrítica da microestrutura
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius (temperatura)
Hz	Hertz (frequência – ciclos por segundo)
J	Joule (unidade de energia)
$\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_5$	Metabissulfito de Potássio
$\mu\Omega$	Micro-Ohm (unidade de resistência elétrica)
mm	Milímetro (unidade de comprimento)
ms	Milissegundo (milésima parte do segundo)
Mo	Molibdênio
Ni	Níquel
%	Porcentagem (fração em 100 partes)
kW	Quilowatt (unidade de potência)
L/min	Vazão em litros por minuto

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 OBJETIVOS.....	16
3 REVISÃO TEÓRICA.....	17
3.1 SOLDAGEM A LASER PULSADO ND:YAG.....	17
3.2 AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32205.....	19
3.3 AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 316L.....	20
3.4 REAGENTE BEHARA MODIFICADO.....	21
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
4.1 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA PARA A SOLDAGEM.....	23
4.2 Realização da Soldagem.....	24
4.3 Corte da Amostra.....	27
4.4 Preparação da amostra para análise.....	28
4.5 Análise das peças em microscópios ópticos.....	31
4.6 Análise das imagens obtidas das microestruturas por software ImageJ.....	32
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	33
5.1 Amostra 01 - Soldada com Pulsos de frequência de 6 Hz.....	33
5.2 Amostra 02 - Soldada com Pulsos de frequência de 8 Hz.....	36
5.3 Amostra 03 - Soldada com Pulsos de frequência de 10 Hz.....	37
5.4 Amostra 04 - Soldada com Pulsos de frequência de 12 Hz.....	38
5.5 Análise da fração das microestruturas da amostra no software ImageJ.....	39
6 CONCLUSÃO.....	41
7 REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

A indústria de petróleo e gás apresenta, nas últimas décadas, uma constante evolução tecnológica, impulsionada pela necessidade de aumentar a eficiência, reduzir custos de operação e garantir maior confiabilidade dos equipamentos utilizados em ambientes severos. Entre os materiais empregados em sistemas de transporte, processamento e armazenamento de fluidos corrosivos, os aços inoxidáveis duplex (UNS S32205) e superduplex destacam-se por sua elevada resistência mecânica e excelente desempenho frente a meios contendo íons cloreto. Sua microestrutura bifásica, composta aproximadamente por 50% de ferrita (α) e 50% de austenita (γ), proporciona uma combinação equilibrada de propriedades, unindo alta tenacidade, boa soldabilidade e resistência à corrosão localizada.

Entretanto, processos de união desses materiais, como a soldagem, podem comprometer o balanço entre as fases presentes, favorecendo a formação excessiva de ferrita na zona fundida e na zona termicamente afetada (ZTA), o que reduz a resistência à corrosão por pite e a tenacidade do conjunto. Nesse contexto, a soldagem a laser Nd:YAG (Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet) tem se mostrado uma alternativa eficiente para unir materiais de elevada exigência tecnológica. Trata-se de um processo de baixa entrada de calor, alta precisão e mínima distorção, adequado para aplicações que requerem controle microestrutural rigoroso.

No entanto, mesmo em processos de soldagem de alta precisão, como o Nd:YAG pulsado, o desbalanceamento microestrutural ainda é um desafio. A utilização de materiais dissimilares, como aços inoxidáveis duplex e austeníticos, tem sido estudada como uma estratégia para promover maior estabilização da fase austenítica no metal de solda, explorando o teor de níquel do AISI 316L como elemento austenitizante natural.

Considerando o impacto econômico e operacional de falhas por corrosão em equipamentos da indústria de petróleo e gás, torna-se essencial investigar e controlar os parâmetros de soldagem, de modo a garantir juntas seguras, com propriedades mecânicas e metalúrgicas adequadas. Assim, este trabalho tem como objetivo geral avaliar a influência da frequência de pulsos do processo de soldagem a laser Nd:YAG na fração volumétrica de austenita formada em juntas dissimilares entre os aços inoxidáveis duplex UNS S32205 e austenítico AISI 316L. Para atingir

esse objetivo, foram realizadas soldagens de juntas de topo variando-se a frequência de pulsos entre 6 e 12 Hz, mantendo constantes os demais parâmetros do processo, de modo a permitir uma análise comparativa. As juntas soldadas foram caracterizadas por microscopia óptica, analisando-se a integridade dos cordões e a proporção entre as fases presentes. Posteriormente, foi realizada a quantificação da fração de austenita com o auxílio do software ImageJ, correlacionando o aumento da frequência de pulsos com o enriquecimento da fase austenítica e com a qualidade metalúrgica do cordão de solda.

Dessa forma, pretende-se contribuir para o avanço do conhecimento na área de soldagem a laser de materiais dissimilares, oferecendo subsídios para a aplicação industrial em sistemas críticos da indústria de petróleo e gás.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a influência da frequência de pulsos do processo de soldagem a laser Nd:YAG na fração volumétrica de austenita formada em juntas dissimilares entre os aços inoxidáveis duplex UNS S32205 e austenítico AISI 316L, de modo a determinar a viabilidade técnica do processo para aplicações na indústria de petróleo e gás. Para atingir esse propósito, buscou-se realizar soldagens de juntas de topo variando a frequência de pulsos entre 6 e 12 Hz, mantendo constantes os demais parâmetros de processo, caracterizar as juntas soldadas por microscopia óptica, analisar a integridade do cordão de solda e a penetração, quantificar a fração de austenita formada por meio do software ImageJ e correlacionar os resultados com os parâmetros de soldagem, de modo a verificar a influência da frequência no balanço ferrita/austenita e na qualidade metalúrgica da junta. Ao final, os resultados obtidos foram discutidos para avaliar a viabilidade da soldagem dissimilar Nd:YAG como alternativa aplicável em componentes críticos da indústria de petróleo e gás.

3 REVISÃO TEÓRICA

3.1 SOLDAGEM A LASER PULSADO ND:YAG

A soldagem a laser pulsado Nd:YAG, cuja emissão fundamental situa-se em 1064 nm, consolidou-se nas últimas quatro décadas como método preferencial para união de componentes metálicos de pequena espessura e alta precisão. A combinação de pulsos breves, tipicamente entre 0,1 e 20 ms, com picos de potência que superam 10^3 J cm^{-2} gera fusão localizada, mantendo zona termicamente afetada (ZTA) mínima e distorção quase nula, fatores decisivos para aplicações biomédicas, aeroespaciais e eletrônicas.

Do ponto de vista físico, dois regimes predominam. Em energias específicas baixas forma-se uma poça de condução, pouco profunda e de superfície lisa; à medida que a densidade de potência cresce, a pressão de vapor abre um keyhole que favorece penetrações de até 3 mm, aumentando a razão profundidade/largura do cordão. A dinâmica desse keyhole depende fortemente do formato de pulso (quadrado, rampa, “burst”), o qual controla a estabilidade da cavidade e, por consequência, a incidência de porosidade e respingos.

Entre os parâmetros de processo, destacam-se a energia de pulso (0,5–50 J), a duração (0,5–10 ms), a frequência (1–200 Hz) e o diâmetro focal (0,2–1,5 mm). Ajustes sutis nesses fatores alteram não só a penetração, mas também as tensões residuais e a morfologia da ZTA. Trabalhos recentes em soldagem Al-Cu demonstram que a distribuição de energia dentro do pulso, razão entre picos e vales, influencia diretamente a mistura de elementos e a condutividade elétrica do conjunto.

Já em ligas de magnésio AZ31, a aplicação de pulsos múltiplos sob vácuo reduziu a porosidade decorrente da vaporização de Zn e melhorou a molhabilidade da poça.

A rápida taxa de resfriamento típica (10^3 – 10^6 °C s^{-1}) gera grãos equiaxiais ultrafinos na zona fundida, enquanto a ZTA apresenta crescimento colunar dirigido pelo gradiente térmico. Em ligas memória de forma NiTi, pesquisadores observaram que a redução do tempo de pulso refina precipitados Ti_3Ni_4 , modulando a superelasticidade após tratamento térmico. Já em aços microligados ou alumínio série 2000, gradientes acentuados podem induzir trincas liquacionais;

pré-aquecimentos moderados mitigam o problema ao reduzir a velocidade de solidificação.

A versatilidade do Nd:YAG pulsado evidencia-se na soldagem de materiais especiais. Unidades de bateria Li-íon empregam pulsos de 15–20 J e 3–5 ms para unir abas de alumínio 1050 a barramentos híbridos Al/Cu, mantendo resistência elétrica abaixo de 150 $\mu\Omega$ e prolongando a vida em ciclos. Para juntas dissimilares titânio–aço inox, a introdução de nióbio como metal de adição durante pulsos modelados limita a formação de intermetálicos frágeis Fe-Ti, elevando a tenacidade da interface. Em chapas de magnésio, estratégias de blindagem gasosa com Ar-He e estratégias de pulse-shaping mostraram queda sensível em inclusão de poros. Entre as vantagens do processo destacam-se a baixíssima entrada de calor, a precisão milimétrica obtida pela entrega do feixe via fibra ótica, a alta repetitividade garantida por formas de pulso programáveis e a capacidade de soldar metais refletivos, como cobre ou ouro, graças aos altos picos de potência. Tais atributos permitem unir folhas metálicas inferiores a 0,5 mm sem deformação significativa, algo difícil para técnicas convencionais.

As limitações residem na penetração modesta (geralmente < 3 mm), no custo inicial elevado do equipamento e na suscetibilidade a porosidade ou trinca em ligas de elevada condutividade térmica. Além disso, a radiação infravermelha invisível de classe IV impõe requisitos estritos de segurança: enclausuramento óptico, intertravamento de portas e EPIs específicos, conforme orienta o OSHA Technical Manual.

Avanços recentes incluem sistemas de bombeamento por diodos de alta eficiência, capazes de ultrapassar 200 Hz mantendo estabilidade energética; moduladores acústico-ópticos que “esculpem” o pulso em tempo real, aprimorando o controle do keyhole em chapas finas de aço inox; e rotinas de monitoramento in-situ que correlacionam emissão de plasma a defeitos internos, permitindo ajustes automáticos guiados por IA.

Para o horizonte 2025-2030, espera-se maior integração com robôs colaborativos e visão 3D em micro-montagem, além da aplicação em condutores de cobre ultra fino para veículos elétricos. Pesquisas em óptica adaptativa e feixes de perfil Bessel visam ampliar a tolerância a desfoque e uniformizar a profundidade de penetração, abrindo caminho para unir materiais altamente refletivos em larga escala industrial.

3.2 AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX UNS S32205

O aço inoxidável duplex UNS S32205 é um material amplamente utilizado em aplicações industriais que exigem alta resistência mecânica e excelente resistência à corrosão, especialmente em ambientes agressivos, como aqueles encontrados na indústria de petróleo e gás, química e naval. Esse tipo de aço pertence à classe dos aços duplex, caracterizados por possuírem uma microestrutura equilibrada entre 50% ferrita e 50% austenita, o que confere um desempenho superior em comparação aos aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos tradicionais.

Entre as principais vantagens do UNS S32205, destacam-se sua alta resistência mecânica, que é aproximadamente o dobro da resistência dos aços inoxidáveis austeníticos como o AISI 316L, e sua excelente resistência à corrosão, especialmente em ambientes ricos em cloretos, onde apresenta elevada resistência à corrosão por pites (pitting), corrosão por fresta e corrosão sob tensão. Além disso, sua microestrutura bifásica proporciona boa resistência à fadiga e ao impacto, tornando-o um material confiável para aplicações estruturais sujeitas a cargas cíclicas.

A composição química do aço inoxidável duplex UNS S32205 é projetada para otimizar suas propriedades mecânicas e resistência à corrosão. Ele contém 22% a 23% de cromo (Cr), que contribui para a formação da camada passiva protetora contra corrosão, 4,5% a 6,5% de níquel (Ni), que estabiliza a fase austenítica, e 3,0% a 3,5% de molibdênio (Mo), que melhora a resistência à corrosão localizada. Além disso, o nitrogênio (N), presente em torno de 0,14% a 0,20%, desempenha um papel fundamental no aumento da resistência mecânica e na estabilidade da austenita. A presença equilibrada de ferro, manganês, silício e fósforo complementa a liga, garantindo um comportamento ideal em diversas condições operacionais.

A microestrutura do UNS S32205 é composta aproximadamente por metade ferrita (α) e metade austenita (γ). A ferrita é responsável por conferir ao material alta resistência mecânica e ao desgaste, enquanto a austenita melhora sua ductilidade e resistência à corrosão. Essa combinação garante um desempenho mais equilibrado do que os aços inoxidáveis convencionais. No entanto, a soldagem deste material pode alterar esse equilíbrio microestrutural, favorecendo o aumento da fração ferrítica na zona fundida, o que pode reduzir sua resistência à corrosão. Para

minimizar esse efeito, técnicas como o controle térmico do processo, a adição de elementos austenitizantes (como níquel) e tratamentos térmicos pós-soldagem podem ser aplicadas.

Devido às suas excelentes propriedades, o aço inoxidável UNS S32205 é amplamente empregado em diversos setores industriais. Na indústria de petróleo e gás, é utilizado em tubulações, trocadores de calor e equipamentos de extração e refino. No setor químico e petroquímico, compõe tanques de armazenamento, reatores e sistemas de tubulação que operam sob condições altamente corrosivas. Na indústria naval e marítima, é utilizado na fabricação de estruturas de navios, plataformas offshore e sistemas de dessalinização. Além disso, também é empregado na indústria de papel e celulose e na indústria de energia, especialmente em componentes de usinas térmicas e nucleares.

3.3 AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 316L

O aço inoxidável AISI 316L é um dos materiais mais utilizados em aplicações industriais que exigem alta resistência à corrosão, boa soldabilidade e excelente ductilidade. Ele pertence à classe dos aços inoxidáveis austeníticos, caracterizados por uma estrutura cristalina totalmente austenítica (γ), o que garante elevada resistência mecânica, boa conformabilidade e excelente tenacidade, mesmo em baixas temperaturas.

Uma das principais vantagens do AISI 316L é sua excepcional resistência à corrosão, especialmente em ambientes contendo cloretos, como os encontrados na indústria química, marítima e de petróleo e gás. Comparado ao AISI 304, ele apresenta maior resistência à corrosão localizada (pitting e fresta) devido à presença de molibdênio (Mo) em sua composição. Além disso, por possuir baixo teor de carbono (L – Low Carbon, $\leq 0,03\%$), o AISI 316L tem menor suscetibilidade à corrosão intergranular após processos de soldagem, eliminando a necessidade de tratamentos térmicos pós-soldagem para estabilização da microestrutura.

A composição química do AISI 316L é cuidadosamente equilibrada para garantir suas propriedades desejadas. Ele contém 16% a 18% de cromo (Cr), responsável pela formação da camada passiva protetora contra corrosão, 10% a 14% de níquel (Ni), que estabiliza a fase austenítica e melhora a resistência à corrosão e à oxidação, e 2% a 3% de molibdênio (Mo), que aumenta

significativamente a resistência à corrosão em meios agressivos. Além disso, o teor de carbono (C) é mantido abaixo de 0,03%, evitando a precipitação de carbonetos de cromo nas bordas dos grãos, o que poderia comprometer a resistência à corrosão intergranular. Outros elementos, como manganês (Mn), silício (Si) e fósforo (P), complementam sua composição química, otimizando suas propriedades mecânicas e térmicas.

A microestrutura do AISI 316L é totalmente austenítica (γ), conferindo-lhe alta ductilidade, boa resistência ao impacto e excelente capacidade de conformação a frio. Ao contrário dos aços inoxidáveis duplex, ele não contém frações significativas de ferrita em sua estrutura, o que resulta em maior resistência à corrosão sob tensão, especialmente em meios contendo íons cloreto. Essa característica faz com que o AISI 316L seja amplamente empregado em ambientes expostos a agentes químicos agressivos e atmosferas corrosivas.

Devido às suas propriedades superiores, o aço inoxidável AISI 316L é amplamente utilizado em diversos setores industriais. Na indústria química e petroquímica, é empregado em equipamentos de processamento, trocadores de calor e tubulações expostas a meios corrosivos. Na indústria marítima e offshore, é utilizado na fabricação de cascos de navios, plataformas e sistemas de dessalinização, onde a resistência à corrosão por água salgada é essencial. No setor médico e farmacêutico, devido à sua biocompatibilidade e facilidade de higienização, é amplamente usado em instrumentos cirúrgicos, implantes ortopédicos e equipamentos hospitalares. Além disso, encontra aplicações na indústria alimentícia, em tanques e tubulações para processamento de alimentos e bebidas, garantindo resistência a ácidos orgânicos e agentes de limpeza agressivos.

3.4 REAGENTE BEHARA MODIFICADO

O reagente de Behara é uma solução química amplamente utilizada na metalografia de aços inoxidáveis duplex e super austeníticos para revelar seletivamente as fases ferrítica (α) e austenítica (γ) presentes na microestrutura. Seu uso é especialmente eficaz na análise de materiais duplex, como o aço inoxidável UNS S32205, pois permite distinguir visualmente as duas fases por meio de contraste de cor ou brilho ao microscópio óptico.

A fórmula original do reagente foi proposta por Behara (1950) para o ataque químico de aços inoxidáveis austenoferríticos. No entanto, ao longo dos anos, modificações foram adotadas para tornar o ataque mais seletivo, menos agressivo e compatível com análises quantitativas por softwares como o ImageJ.

A formulação utilizada neste estudo corresponde à versão modificada do reagente de Behara, composta por: 20 mL de HCl (ácido clorídrico concentrado); 80 mL de água destilada e deionizada; 1,0 g de metabissulfito de potássio ($K_2S_2O_5$); 2,0 g de bifluoreto de amônio (NH_4HF_2).

O ácido clorídrico atua como agente desoxidante e promove a corrosão seletiva dos contornos de grão. O bifluoreto de amônio, por sua vez, reage com as fases ferríticas promovendo maior contraste, enquanto o metabissulfito de potássio funciona como agente redutor, controlando a reatividade da solução. A proporção entre os componentes é crítica para que o ataque seja eficaz sem comprometer a integridade da amostra ou induzir artefatos indesejados na micrografia.

Este reagente é particularmente útil para quantificação da fração volumétrica de ferrita e austenita, etapa essencial na avaliação do desempenho mecânico e da resistência à corrosão de ligas duplex soldadas. A distinção visual clara entre as fases permite aplicação direta de análise digital de imagem, como realizado neste trabalho.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA PARA A SOLDAGEM

Primeiramente, para a preparação das amostras que foram soldadas, foi realizado o corte das chapas utilizando uma guilhotina mecânica, exposta na Figura 1.

Figura 1 – Guilhotina Mecânica



Fonte: Autor, 2025

Em seguida, as amostras cortadas foram retificadas em todas as laterais da espessura com retífica refrigerada a água.

Figura 2 – Amostras na retífica



Fonte: Autor, 2025

4.2 Realização da Soldagem

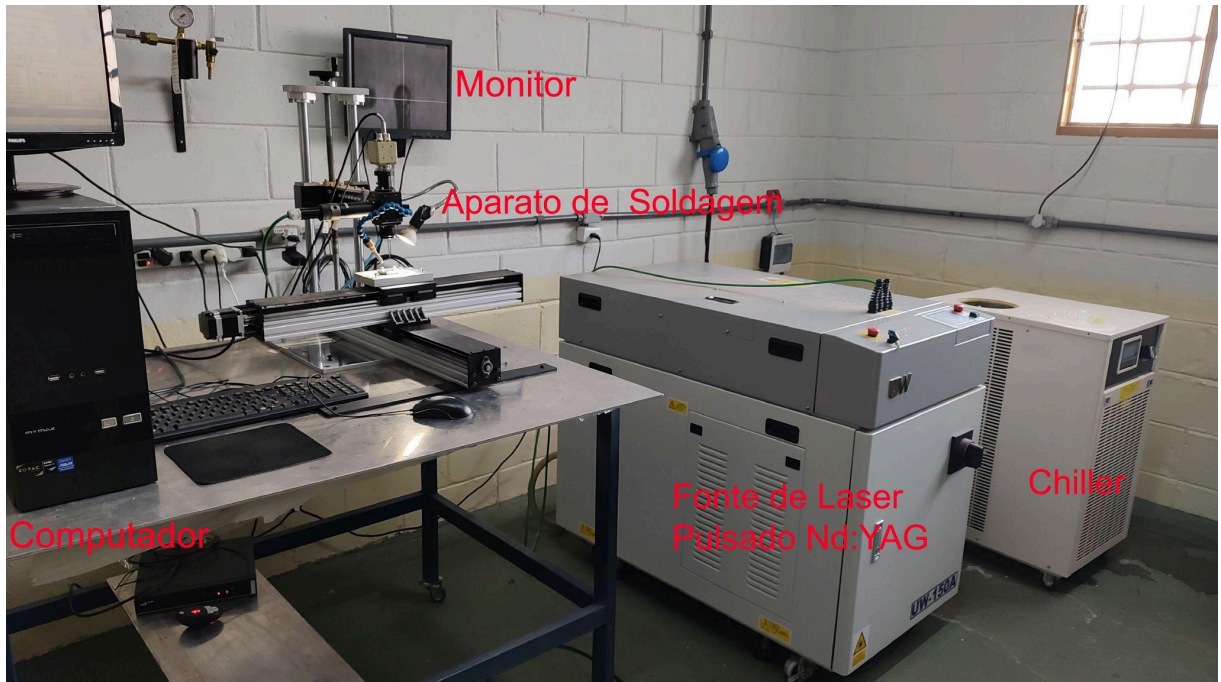
Após as amostras serem cortadas e retificadas, a soldagem por Laser Pulsado Nd:YAG se deu seguindo os seguintes parâmetros:

Tabela 01 - Parâmetros de Soldagem

	Potência de Pico (kW)	Energia do Pulso (J)	Velocidade de Soldagem (mm/s)	Largura Temporal (ms)	Vazão de Argônio (L/min)	Frequência de Pulsos (Hz)
Amostra 01	2,00	12	1,0	6	15	6
Amostra 02	2,00	12	1,0	6	15	8
Amostra 03	2,00	12	1,0	6	15	10
Amostra 04	2,00	12	1,0	6	15	12

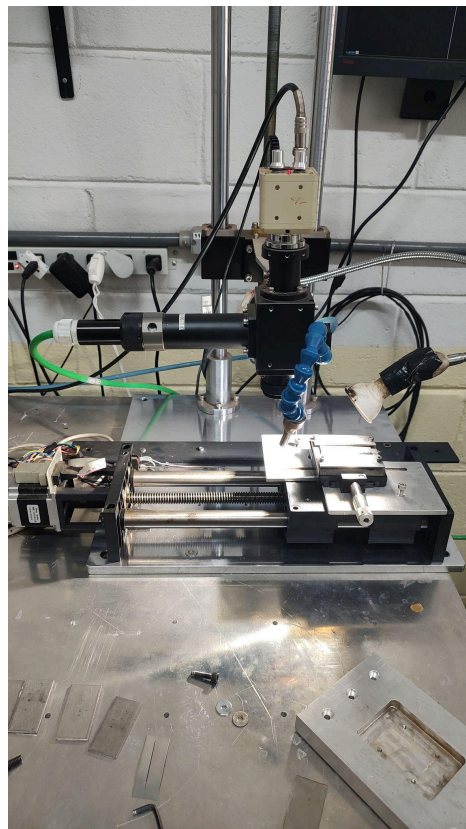
Fonte: Autor, 2025

Figura 3 – Aparato de soldagem montado



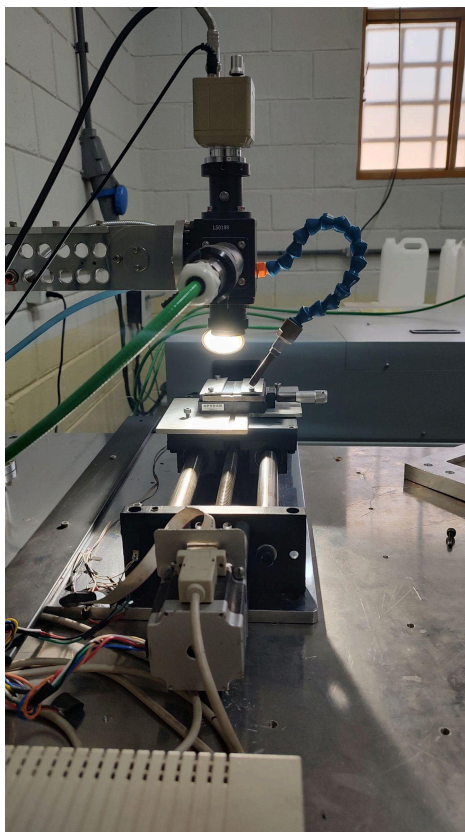
Fonte: Autor, 2025

Figura 4 – Amostras na máquina de solda



Fonte: Autor, 2025

Figura 5 – Amostras na máquina de solda, outro ângulo



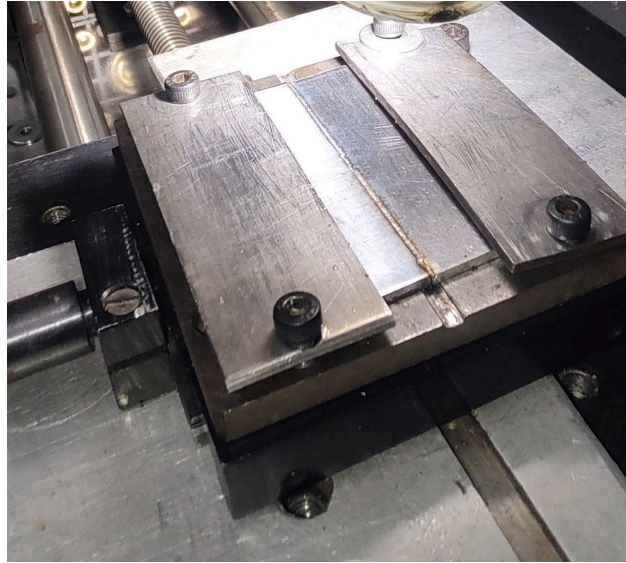
Fonte: Autor, 2025

Figura 6 – Cilindro de argônio com manômetro



Fonte: Autor, 2025

Figura 7 – Amostra já soldada



Fonte: Autor, 2025

4.3 Corte da Amostra

Após a soldagem, a amostra, já fria, foi cortada, por meio de máquina de corte, com disco de corte refrigerado a água, a amostra foi fixada no interior da máquina por meio de duas morsas.

Figura 8 – Máquina de corte



Fonte: Autor, 2025

4.4 Preparação da amostra para análise

A preparação das amostras se iniciou após o corte das quatro peças; todas foram embutidas em baquelite preto , em molde circular de 30 mm de diâmetro.

Figura 9 – Embutidoras do laboratório



Fonte: Autor, 2025

Figura 10 – Amostra Embutida



Fonte: Autor, 2025

Em seguida, todas as amostras embutidas foram lixadas em lixas d'água com granulação 100, 120, 220, 320, 400, 600 e 1500.

Figura 11 – Suporte para lixas úmido



Fonte: Autor, 2025

Ademais, foram polidas, em politriz circular, com disco de pano com adição de água e suspensão de alumina de 1 micrômetro de granulação.

Figura 12 – Politriz do laboratório



Fonte: Autor, 2025

Por fim, foi realizado um ataque químico sobre a superfície polida em cada amostra, utilizando reagente Behara, com a formulação descrita anteriormente, a fim de evidenciar o cordão de solda realizado anteriormente.

4.5 Análise das peças em microscópios ópticos

Com as peças prontas, analisou-se todas nos microscópios ópticos do laboratório, primeiramente um de aumento macro, de 1x a 8x, após isto foi utilizado um de 5x a 100x.

Figura 13 – Microscópio para macrografia do laboratório



Fonte: Autor, 2025

Figura 14 – Microscópio para micrografia do laboratório



Fonte: Autor, 2025

4.6 Análise das imagens obtidas das microestruturas por software ImageJ

Obtidas as imagens do microscópio, estas foram utilizadas para quantificar porcentagem de ferrita e consequentemente, austenita presente na secção do cordão de solda; para tal, foi utilizado o software gratuito, ImageJ; com este software foi feita a média das microestruturas formadas e o desvio padrão das mesmas.

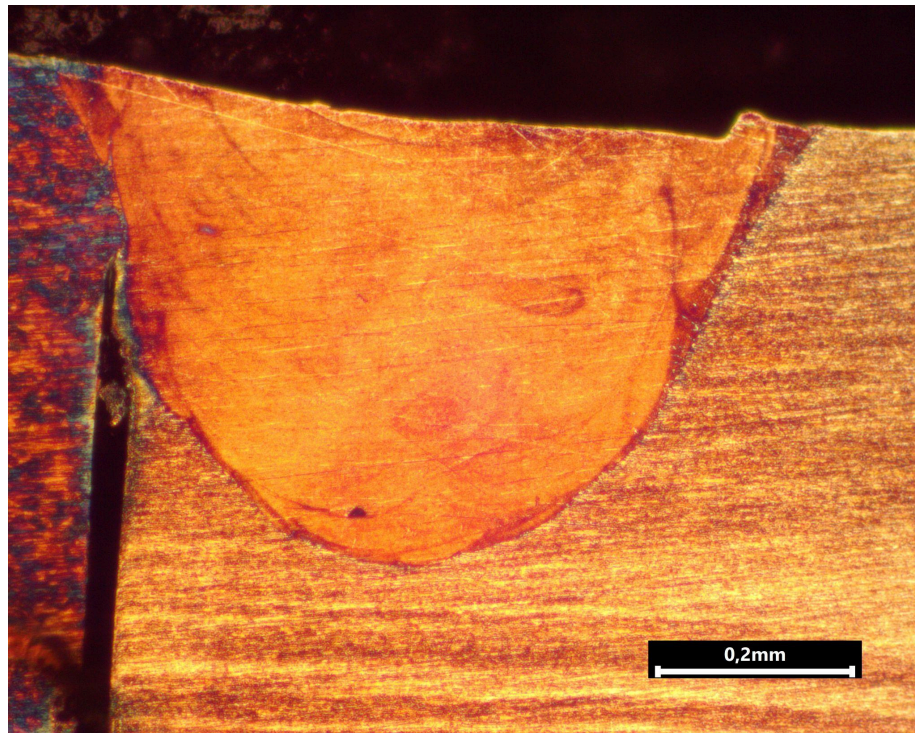
O software ImageJ foi utilizado neste trabalho como ferramenta de análise quantitativa da microestrutura dos metais de solda e do metal base. Após a obtenção das micrografias pelo microscópio óptico, as imagens foram importadas para o programa, que possibilitou o tratamento digital e a segmentação das fases ferrítica e austenítica. A aplicação do reagente de Behara modificado gerou contraste suficiente entre as duas fases, permitindo que o ImageJ identificasse regiões de tonalidade distinta de maneira automatizada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Amostra 01 - Soldada com Pulsos de frequência de 6 Hz

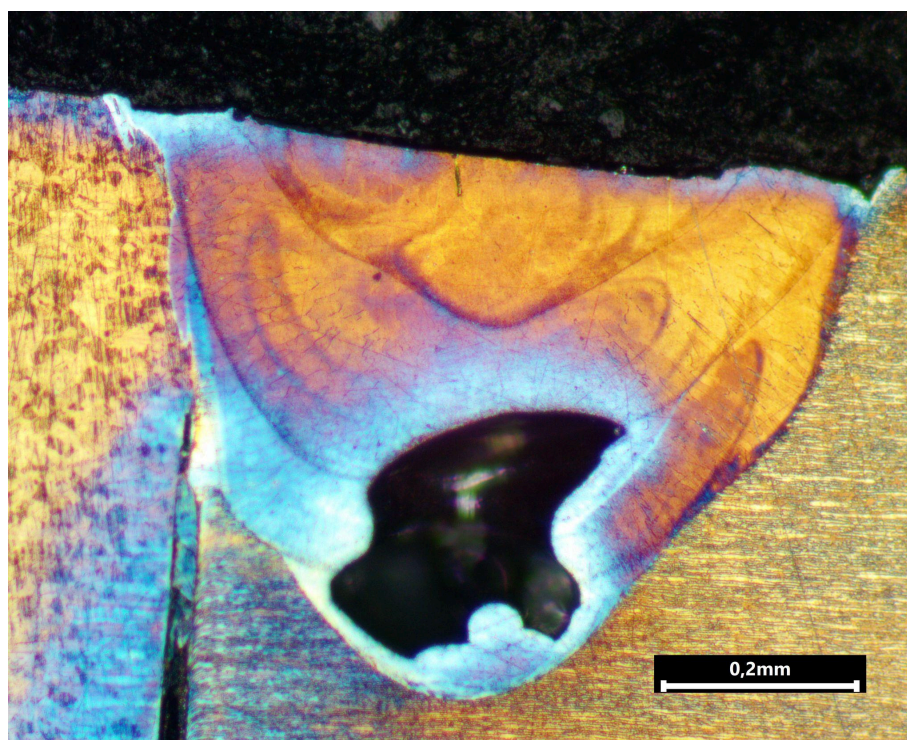
Para a amostra 01, primeiramente foi realizada algumas tentativas falhas no preparo da mesma, sendo estas falhas por desalinhamento do cordão de solda a junção das duas chapas e também, a presença de um vazio no cordão de solda, ambos os casos falhos são retratados nas Figuras 15 a 24.

Figura 15 – Amostra 01 falha por desalinhamento



Fonte: Autor, 2025

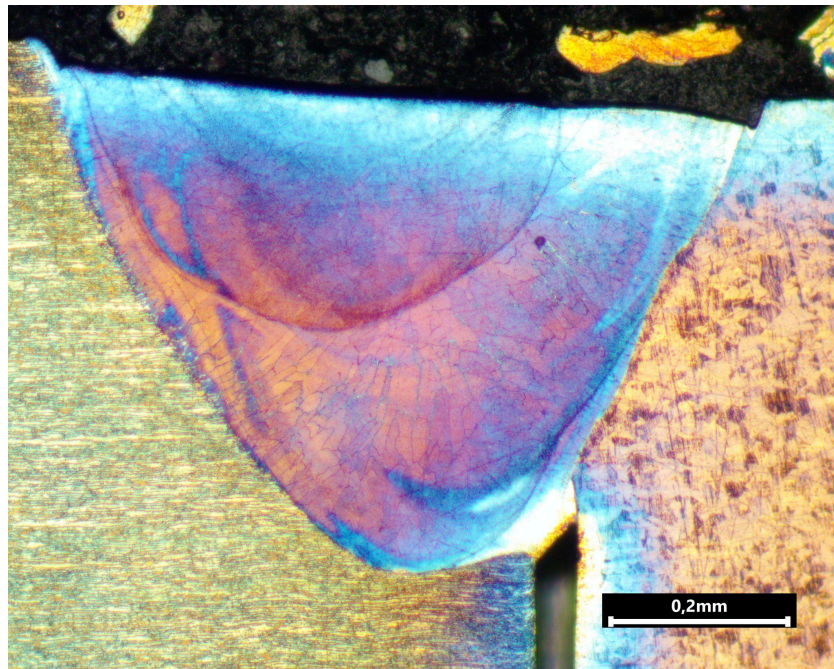
Figura 16 – Amostra 01 falha por vazio no cordão de solda



Fonte: Autor, 2025

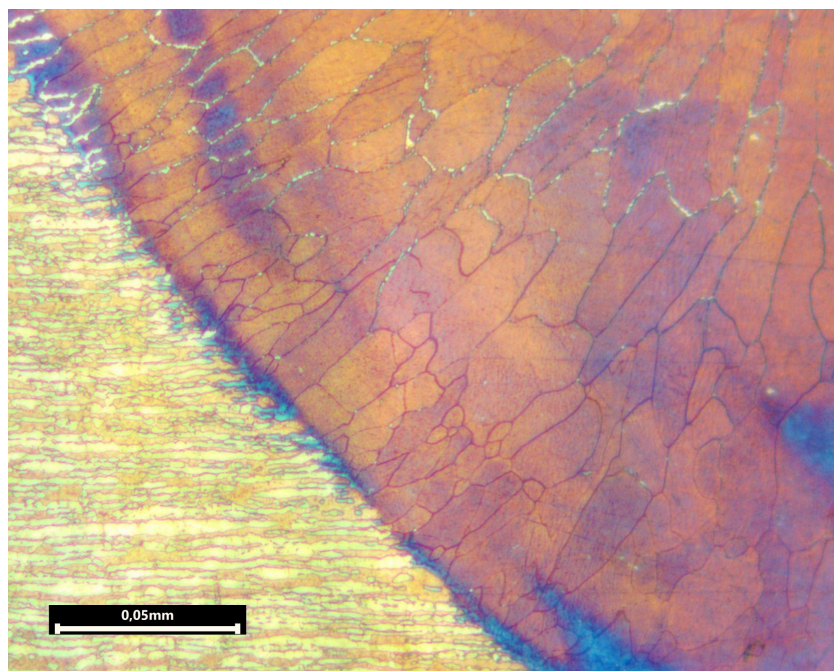
Após isso, foi realizada a preparação de outra amostra, seguindo os mesmos parâmetros aplicados a amostra 01, com isso, desta segunda vez foi obtido um resultado satisfatório.

Figura 17 – Amostra 01



Fonte: Autor, 2025

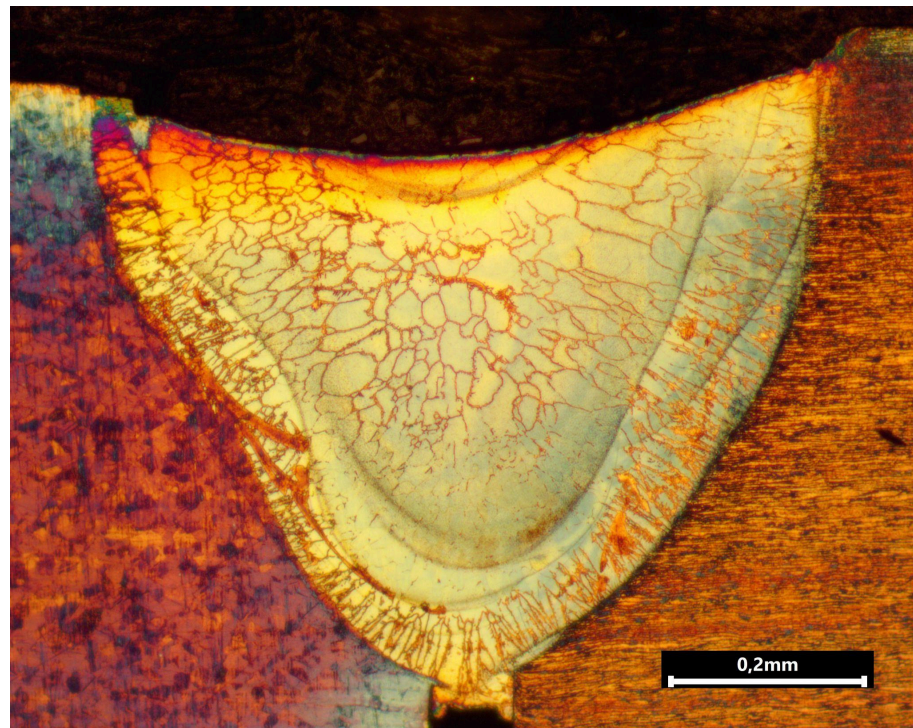
Figura 18 – Amostra 01 Detalhe



Fonte: Autor, 2025

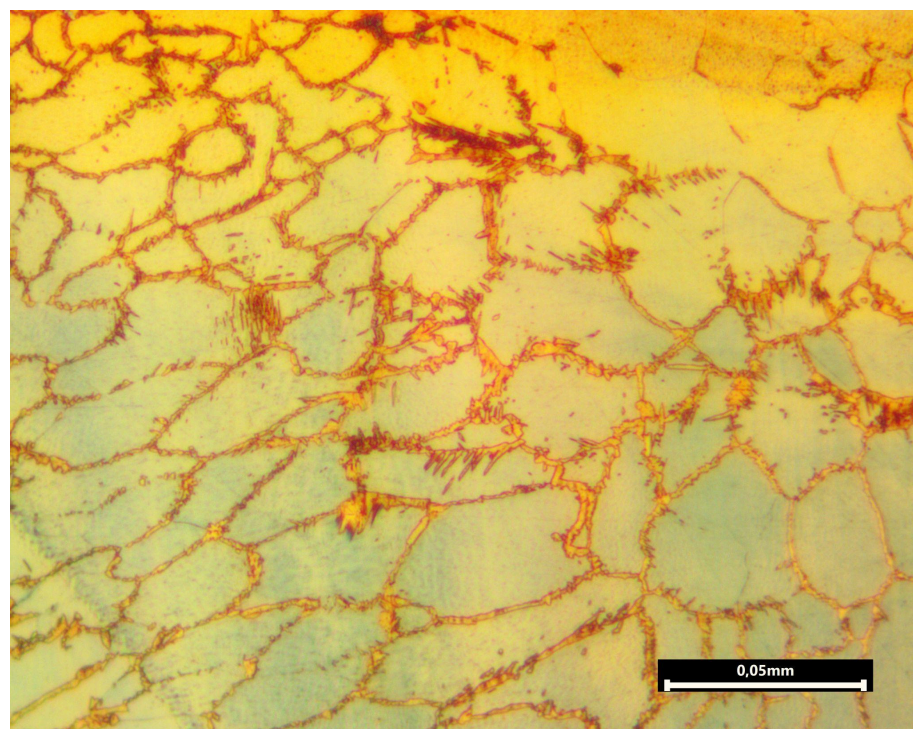
5.2 Amostra 02 - Soldada com Pulsos de frequência de 8 Hz

Figura 19 – Amostra 02



Fonte: Autor, 2025

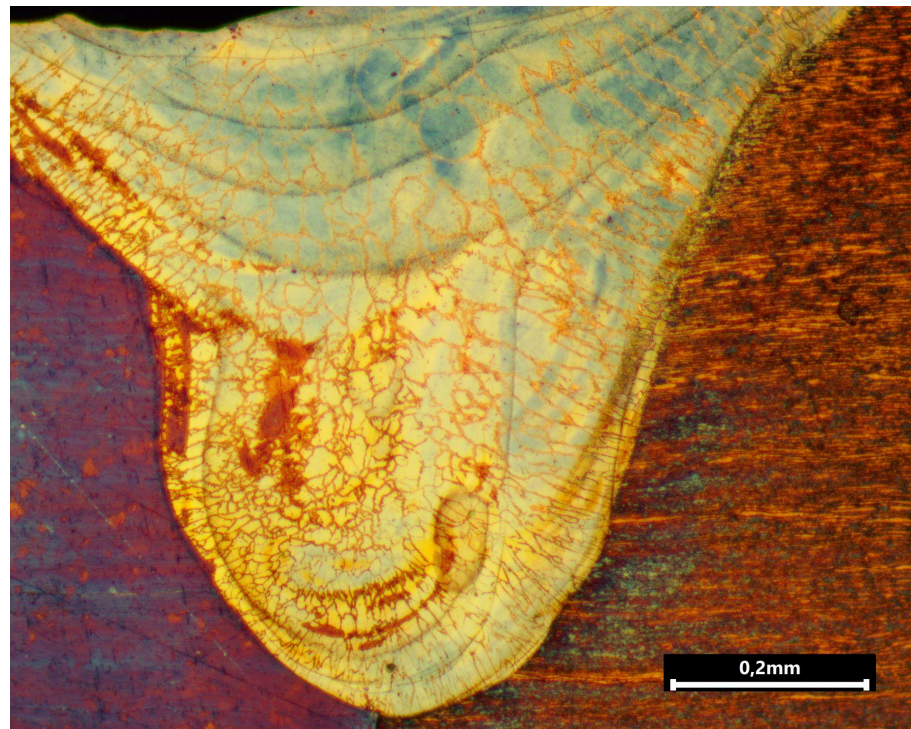
Figura 20 – Amostra 02 Detalhe



Fonte: Autor, 2025

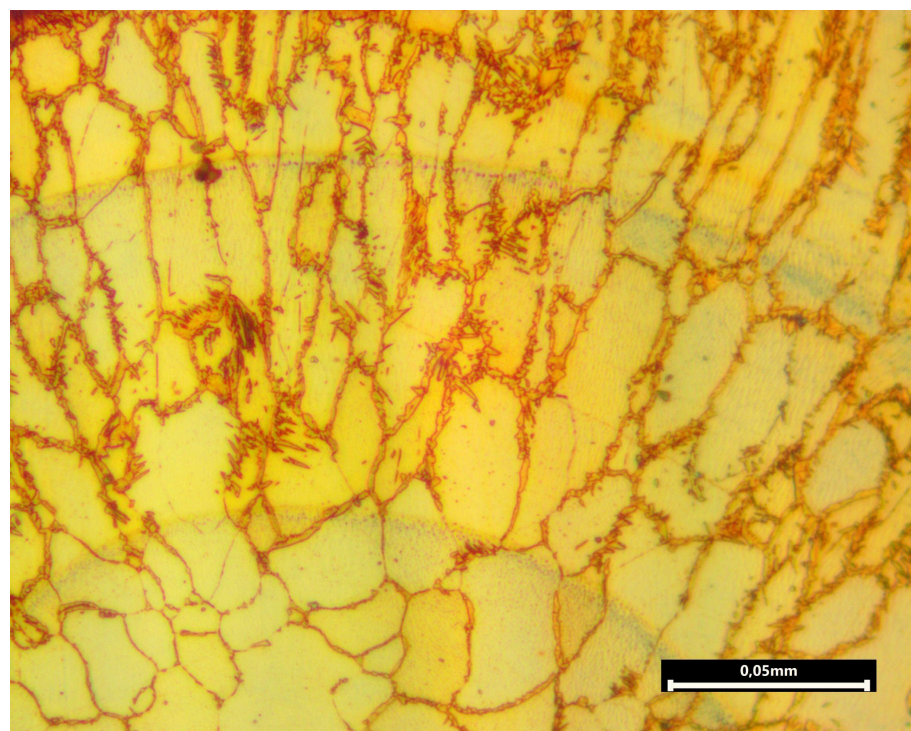
5.3 Amostra 03 - Soldada com Pulsos de frequência de 10 Hz

Figura 21 – Amostra 03



Fonte: Autor, 2025

Figura 22 – Amostra 03 Detalhe



Fonte: Autor, 2025

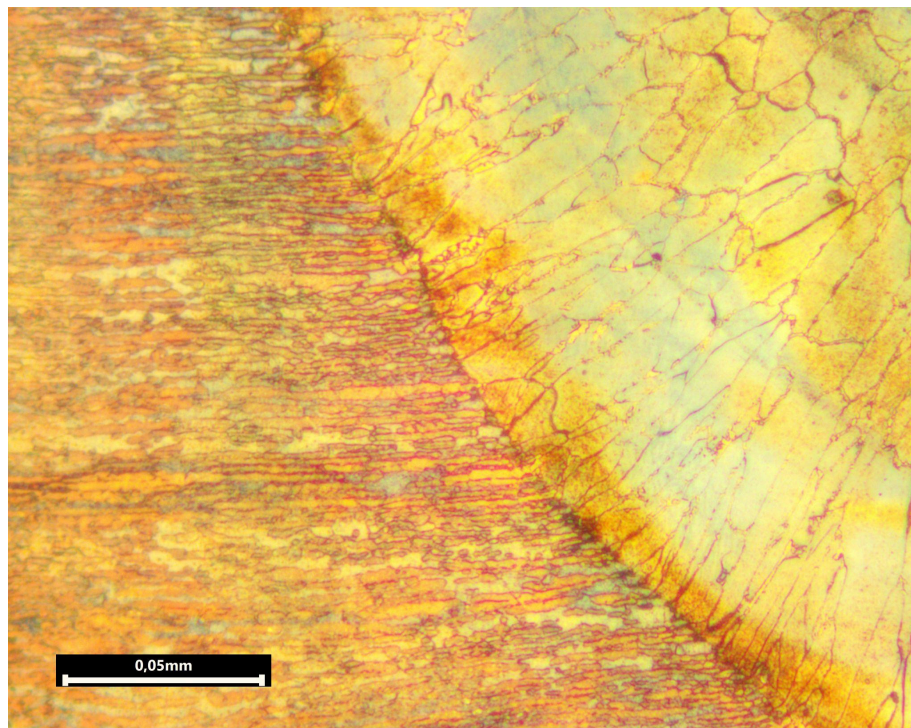
5.4 Amostra 04 - Soldada com Pulsos de frequência de 12 Hz

Figura 23 – Amostra 04



Fonte: Autor, 2025

Figura 24 – Amostra 04 Detalhe

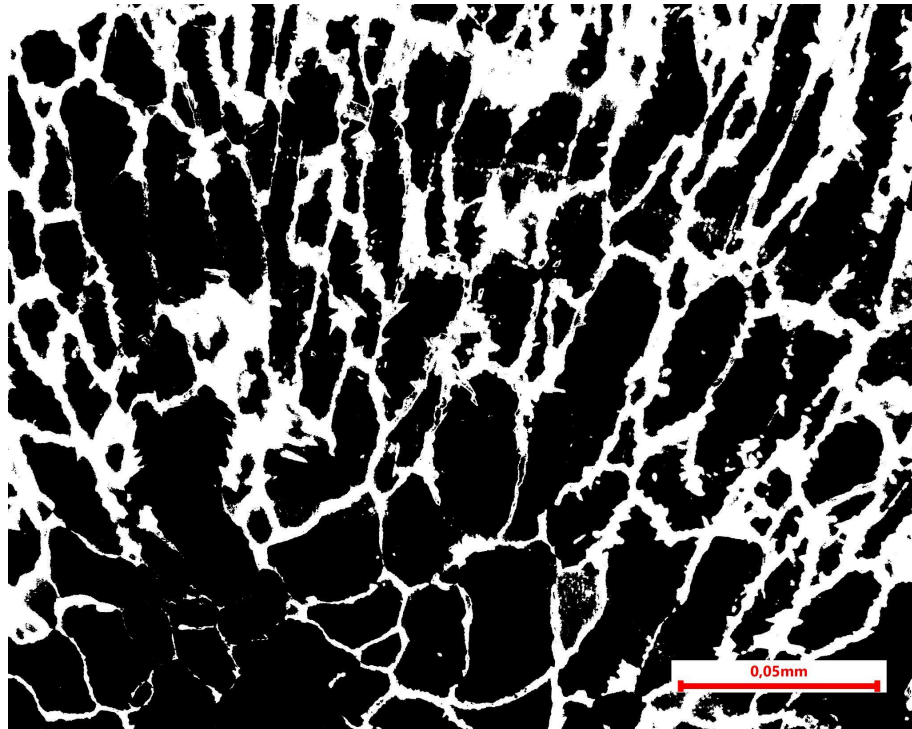


Fonte: Autor, 2025

5.5 Análise da fração das microestruturas da amostra no software ImageJ

Para esta etapa, foram realizadas 10 medições da fração das microestruturas de cada amostra por meio do software ImageJ, com isso foi possível calcular a porcentagem de austenita respectiva de cada amostra, e o desvio padrão da mesma.

Figura 25 – Imagem sob análise no ImageJ



Fonte: Autor, 2025

$$D_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

(1)

Tabela 02 - Análise da fração de austenita na amostra 01

Amostras	Porcentagem de austenita presente	Desvio padrão das medidas
Amostra 01	24,3	5,67
Amostra 02	25,5	8,86
Amostra 03	26,6	9,72
Amostra 04	28,8	8,20

Fonte: Autor, 2025

6 CONCLUSÃO

A soldagem dissimilar entre o aço inoxidável duplex UNS S32205 e o aço austenítico AISI 316L por laser pulsado Nd:YAG mostrou-se viável nas condições analisadas, permitindo a formação de cordões contínuos e com adequada fusão entre os materiais. A variação da frequência dos pulsos provocou alterações sutis no aporte térmico e, conseqüentemente, na microestrutura das amostras, especialmente no balanço entre ferrita e austenita.

A quantificação da fração volumétrica de austenita por meio do software ImageJ indicou valores de 24,3% para a amostra 01, 25,5% para a amostra 02, 26,6% para a amostra 03 e 28,8% para a amostra 04. Embora esses números sugiram um aumento progressivo da fase austenítica entre as condições avaliadas, a análise dos desvios-padrão — 5,67; 8,86; 9,72; e 8,20, respectivamente — demonstra que a variabilidade das medições é maior do que a diferença observada entre os valores médios. Dessa forma, não é possível afirmar que ocorreu, de fato, um aumento real e estatisticamente significativo da fração de austenita com o aumento da frequência dos pulsos.

A caracterização metalográfica evidenciou ainda que pequenas variações no ataque químico influenciaram o contraste das micrografias, como observado na coloração distinta da amostra 01. Apesar disso, todas as amostras permitiram distinção clara entre ferrita e austenita e possibilitaram a quantificação pelo método empregado.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o processo de soldagem por laser pulsado Nd:YAG é capaz de produzir juntas dissimilares entre os materiais estudados com microestrutura adequada e boa qualidade de fusão. No entanto, dentro da faixa de parâmetros utilizada, não foi possível estabelecer uma relação conclusiva entre o aumento da frequência dos pulsos e uma alteração significativa no teor de austenita do metal de solda. Estudos futuros com maior número de amostras, repetição sistemática dos parâmetros e controle mais rigoroso das etapas de ataque químico podem fornecer evidências mais robustas para avaliar essa tendência.

7 REFERÊNCIAS

BRANDI, S. D.; MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J. *Metalurgia da soldagem*. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2012. 232 p.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 10. ed. Hoboken: Wiley, 2018.

CHARLES, J.; BERNHARDSSON, S. Super duplex stainless: structure and properties. In: *DUPLEX STAINLESS STEELS'91*, Beaune, 1991. Proceedings. Les Ulis: Les Éditions de Physique, 1991. v. 1, p. 3–48.

DAVIS, J. R. (ed.). *ASM Specialty Handbook: Stainless Steels*. Materials Park: ASM International, 1994.

HILTON, P. A. Pulsed Nd:YAG laser welding. In: POWELL, J.; KAPLAN, A. F. H. (ed.). *Laser Cutting and Welding*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2009. p. 208–244.

KALPAKJIAN, S. *Manufacturing engineering and technology*. 3. ed. New York: Addison-Wesley Publishing, 1995. 450 p.

KATAYAMA, S. *Handbook of Laser Welding Technologies*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. p. 30–631.

KOU, S. *Welding Metallurgy*. 2. ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2003.

LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*. Hoboken: Wiley-Interscience, 2005.

MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. *Mechanical Behavior of Materials*. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

MODENESI, P. J.; BRANCO, J. R. T.; MARQUES, P. V. *Soldagem: fundamentos e tecnologia*. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2012. 382 p.

PECKNER, D.; BERNSTEIN, I. M. *Handbook of Stainless Steels*. New York: McGraw-Hill, 1997. 1100 p.

READY, J. F. *Industrial Applications of Lasers*. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1997. ISBN 0125839618.

STEEN, W. M. *Laser Material Processing*. 2. ed. London: Springer-Verlag, 1998. ISBN 3540761748.

VENTRELLA, V. A.; BERRETTA, J. R.; ROSSI, W. Pulsed Nd:YAG laser seam welding of AISI 316L stainless steel thin foils. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 210, p. 183–190, 2010.