

Evolução microestrutural do aço inoxidável ferrítico AISI 409 soldado a laser**Microstructural evolution of ferritic stainless steel AISI 409 processed by laser welding****Evolución microestructural del acero inoxidable ferrítico AISI 409 soldado por láser**

Victor Tertuliano Macedo¹
Rafael Nascimento²
Ricardo Luiz Perez Teixeira³

Resumo: Este estudo analisou a evolução microestrutural do aço inoxidável ferrítico AISI 409 submetido à soldagem a laser, visando compreender como o processo de fusão localizada influencia as transformações microestruturais. A pesquisa buscou responder a como o ciclo térmico e os parâmetros de soldagem, sob regime de penetração profunda, correlacionam-se com a microestrutura, a fração de ferrita e a microdureza. A metodologia envolveu a soldagem de chapas de 4 mm com laser Nd:YAG pulsado, seguida de caracterização por microscopias óptica e eletrônica, difratometria de raios X, ferritoscopia e ensaios de microdureza Vickers. Os resultados indicaram uma zona termicamente afetada estreita, com crescimento moderado do grão, e uma zona fundida, com formação de martensita acicular e precipitados de titânio. A microdureza aumentou progressivamente do metal base até a zona fundida, evidenciando o endurecimento local por transformação de fase.

Palavras-chave: Aço inoxidável ferrítico. Laser. Microestrutura. Soldagem. Zona termicamente afetada.

Abstract: This study aimed to analyze the microstructural evolution of ferritic stainless steel AISI 409 during laser welding to determine how localized fusion influences microstructural transformations. The research sought to determine how the thermal cycle and welding parameters, within the deep-penetration regime, correlate with microstructure, ferrite fraction, and microhardness. The methodology involved welding 4 mm plates using a pulsed Nd: YAG laser, followed by characterization using optical and scanning electron microscopy, X-ray diffraction, magnetic ferritoscopy, and Vickers microhardness tests. Results indicated a narrow heat-affected zone with moderate grain growth and a fusion zone characterized by acicular martensite and titanium-rich precipitates. Microhardness increased progressively from the base metal to the fusion zone, highlighting the correlation between phase transformation and local hardening.

Keywords: Ferritic stainless steel. Heat-affected zone. Laser. Microstructure. Welding.

¹ Graduando em engenharia de materiais e bolsista de Iniciação Científica. Universidade Federal de Itajubá, Itabira, MG, Brasil. ORCID <https://orcid.org/0009-0006-1916-9393>. E-mail: d2022006200@unifei.edu.br.

² Mestrando em engenharia de materiais mestrado profissional. Universidade Federal de Itajubá, Itabira, MG, Brasil. ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7313-3427>. E-mail: rnnascimento12@gmail.com.

³ Doutor em engenharia de materiais e metalúrgica. Universidade Federal de Itajubá, Itabira, MG, Brasil. ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2641-4036>. E-mail: ricardo.luiz@unifei.edu.br.

Resumen: El presente estudio tuvo como objetivo analizar la evolución microestructural del acero inoxidable ferrítico AISI 409 sometido a soldadura por láser, con el fin de comprender cómo el proceso de fusión localizada influye en las transformaciones microestructurales. La investigación buscó responder cómo el ciclo térmico y los parámetros de soldadura, bajo el régimen de penetración profunda, se correlacionan con la microestructura, la fracción de ferrita y la microdureza. La metodología incluyó la soldadura de chapas de 4 mm con un láser Nd:YAG pulsado, seguida de la caracterización mediante microscopía óptica y electrónica, difracción de rayos X, ferritoscopia y ensayos de microdureza Vickers. Los resultados indicaron una zona térmicamente afectada estrecha, con crecimiento de grano fino moderado, y una zona fundida, caracterizada por la formación de martensita acicular y de precipitados ricos en titanio. La microdureza aumentó progresivamente desde el metal base hasta la zona fundida, lo que evidencia el endurecimiento local por transformación de fase.

Palabras-clave: Acero inoxidable ferrítico. Láser. Microestructura. Soldadura. Zona afectada termicamente.

Submetido 11/11/2025

Aceito 06/03/2026

Publicado 11/03/2026

Considerações iniciais

O processo de soldagem a laser caracteriza-se pela aplicação de um feixe de energia altamente concentrado, capaz de promover fusão localizada com ampla profundidade de penetração e estreita zona termicamente afetada (ZTA). Essa característica resulta em baixo aporte térmico, mínima distorção geométrica e reduzida geração de tensões residuais. Conforme Klimpel (2024, p. 2), “*the main advantages of laser beam welding technology ... are ... very narrow HAZ, low deformation, and almost zero residual stress*” (as principais vantagens da tecnologia de soldagem a laser são a zona termicamente afetada muito estreita, baixa deformação e praticamente ausência de tensões residuais). Tal precisão e controle térmico tornam o processo particularmente adequado para materiais sensíveis ao calor e para aplicações industriais que demandam alta qualidade dimensional e produtividade, como nas indústrias automotiva e metalmeccânica (Klimpel, 2024).

Estudos recentes indicam que ajustes nos parâmetros do feixe laser, como amplitude de oscilação e diâmetro do ponto focal, influenciam significativamente a morfologia e o desempenho mecânico da junta soldada. Zhang *et al.* (2024) demonstraram que a variação controlada da oscilação do feixe em metais de alta condutividade térmica promove refinamento de grão e melhoria da homogeneidade microestrutural. Em aços inoxidáveis ferríticos, como o AISI 409, Gu *et al.* (2023) observaram que a modificação do diâmetro do feixe laser permite controlar a plasticidade da junta soldada e reduzir gradientes de tensão interna, evidenciando a importância do controle do aporte energético na obtenção de soldas mais tenazes e uniformes.

A soldagem a laser de aços inoxidáveis ferríticos, também denominada Laser Beam Welding (LBW), é um processo de união por fusão que utiliza fótons de alta densidade de energia para fundir o metal base e, quando necessário, o metal de adição, com mínima ZTA e elevada taxa de resfriamento (Modenesi; Marques, 2000). Entre suas principais vantagens destacam-se a precisão dimensional, a baixa distorção térmica e o excelente acabamento superficial. Essas características consolidam a LBW como uma alternativa tecnológica de alto desempenho em relação aos processos convencionais de soldagem a arco, sendo amplamente empregada na fabricação de componentes estruturais e automotivos de aço inoxidável ferrítico, como o AISI 409.

Do ponto de vista metalúrgico, a soldagem de aços inoxidáveis ferríticos impõe desafios específicos relacionados à estabilidade da fase ferrítica, à possível formação de martensita por

resfriamento rápido e à precipitação de carbonetos e nitretos ricos em cromo ou titânio, conforme discutido por Lippold e Kotecki (2005) e Lacerda (2007).

Nos aços inoxidáveis ferríticos, o controle rigoroso do aporte térmico é essencial para evitar a formação de fases indesejadas, como martensita, carbonetos e nitretos de cromo, que reduzem a tenacidade e a resistência à corrosão. Lacerda (2007) demonstrou que a variação do calor de soldagem influencia diretamente a microestrutura da zona fundida e da ZTA, alterando a transição dúctil-frágil (DBTT) e a tenacidade do aço AISI 409. Segundo o autor, sob menor aporte térmico e atmosfera de proteção adequada, a microestrutura se mantém predominantemente ferrítica, reduzindo a fragilização por precipitados ricos em cromo e nitrogênio.

De forma complementar, Berton (2014) verificou que a adição controlada de nitrogênio à atmosfera protetora durante a soldagem a laser pode refinar a microestrutura e elevar a resistência à corrosão das juntas soldadas. O nitrogênio atua como estabilizador da ferrita e favorece a formação de camadas passivas mais resistentes, contribuindo para a homogeneidade estrutural de aços ferríticos submetidos a tratamentos térmicos ou termoquímicos subsequentes. Esses resultados são particularmente relevantes para o processo a laser, cuja alta taxa de resfriamento favorece a incorporação de nitrogênio em solução sólida e reduz o tempo disponível para precipitação de fases deletérias.

Casarin (2018) reforça que a soldagem a laser, por ser um processo não convencional de alta densidade energética, apresenta vantagens significativas sobre técnicas como GMAW e TIG, sobretudo em aplicações que exigem precisão dimensional, baixa distorção térmica e elevada produtividade. O autor ressalta ainda que os parâmetros de potência, velocidade de avanço e posição do foco devem ser rigorosamente ajustados para garantir a integridade metalúrgica e mecânica da junta soldada, sendo estes os fatores determinantes para o sucesso do processo.

O aço inoxidável ferrítico AISI 409, pertencente à série 400, apresenta estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) e teor moderado de cromo (10,5-11,5 %), além de pequenas frações de carbono (~0,02 %), manganês, silício e titânio - este último adicionado para estabilizar o carbono e evitar a formação de carbeto de cromo durante o ciclo térmico (Morais; Corrêa; Lopes, 2022). Essa composição confere ao material boa resistência à oxidação e estabilidade térmica, tornando-o amplamente utilizado em sistemas de escapamento

automotivos, equipamentos agrícolas e estruturas expostas a atmosferas oxidantes (Souza *et al.*, 2017).

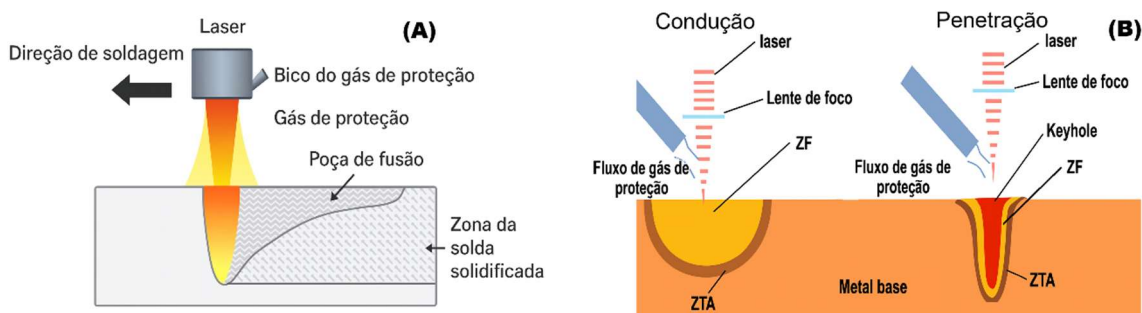
Durante a soldagem do AISI 409, especialmente sob condições de resfriamento rápido, ocorrem transformações microestruturais intensas, incluindo a formação de martensita acicular na ZF e a predominância de ferrita alfa na ZTA. Essas transformações influenciam diretamente a tenacidade, a resistência à corrosão e o comportamento mecânico da junta (Morais *et al.*, 2022). Assim, o controle do aporte térmico, a adição de nitrogênio ao gás de proteção e a modulação da taxa de resfriamento constituem medidas essenciais para minimizar trincas, precipitação de nitretos/carbonetos e perdas de integridade metalúrgica (Lacerda, 2007).

Pesquisas recentes confirmam que a soldagem a laser do aço AISI 409, ilustrada na Figura 1(A), produz juntas de alta qualidade, caracterizadas por ZTA estreita e excelente controle metalúrgico, o que favorece o desempenho mecânico e a durabilidade em aplicações industriais exigentes (Borges; de Rezende, 2025; Esfahani; Coupland; Marimuthu, 2015; Moraes *et al.*, 2021).

Do ponto de vista ambiental, Bevilacqua *et al.* (2019) destacam que a soldagem a laser apresenta impacto ambiental significativamente menor que os processos de arco elétrico, em virtude do maior rendimento energético e do controle localizado do calor, que reduzem consumo de energia e emissões de gases.

Segundo Lawan Rominiyi e Mashinini (2024), a soldagem a laser, conforme mostrada na Figura 1(A), opera basicamente em dois modos térmicos distintos: o modo de condução, no qual o calor é transmitido por condução térmica, resultando em cordões superficiais e largos, e o modo de penetração (*keyhole*), no qual a alta densidade de energia forma uma cavidade capilar que possibilita grande profundidade de penetração e maior resistência da junta. Esses dois regimes estão representados na Figura 1(B) e são essenciais para compreender o comportamento térmico e metalúrgico do processo.

Figura 01: Representação esquemática do processo de soldagem a laser, (A) destacando o feixe incidente de laser, o cordão de solda e em (B) as regiões de metal base, zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF).



Fonte: Adaptado de Esfahani, Coupland e Marimuthu (2015) e Rominiyi e Mashinini (2024).

Embora diversos estudos abordem a soldagem a laser de aços inoxidáveis, ainda há lacunas quanto à correlação direta entre microestrutura, fração de ferrita e microdureza em chapas de aço inoxidável ferrítico AISI 409 com espessura de 4 mm soldadas sob regime de penetração profunda (*keyhole*). Assim, este trabalho busca contribuir para o entendimento dessas correlações sob um conjunto específico de parâmetros de soldagem, com implicações diretas para aplicações automotivas e estruturais.

Para atingir esse propósito, foram empregadas técnicas de caracterização microestrutural e de fase, incluindo microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV), difratometria de raios X (DRX) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS), além da determinação quantitativa da fração de ferrita por ferritoscopia magnética.

Este estudo busca compreender as transformações microestruturais induzidas pelo ciclo térmico da soldagem nas diferentes regiões da junta - metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF) - correlacionando as variações de fase e dureza às condições de processamento. Os resultados pretendem auxiliar na otimização dos parâmetros de soldagem e fortalecer a aplicabilidade industrial do processo, com foco em juntas de alta integridade metalúrgica e desempenho mecânico aprimorado.

Metodologia

O estudo teve como foco avaliar as transformações microestruturais resultantes da soldagem a laser do aço inoxidável ferrítico AISI 409. O material utilizado consistiu em chapas laminadas a frio com espessura de 4 mm e composição química média de 11 % Cr, 0,02 % C, 0,5 % Mn e 0,4 % Si, estabilizadas por titânio. Essa composição está em conformidade com a literatura (Morais; Corrêa; Lopes, 2022), que descreve o AISI 409 como uma liga ferrítica de baixo teor de níquel e moderado teor de cromo, apresentando boa resistência à oxidação e conformabilidade adequada para aplicações automotivas.

As amostras foram cortadas em dimensões de 100 mm × 40 mm, preparadas por lixamento mecânico com lixas de granulação 220 a 1200 e limpeza com álcool isopropílico, de modo a eliminar resíduos e óxidos superficiais, conforme procedimento adaptado de Lacerda (2007). O processo de soldagem a laser foi realizado utilizando um sistema de laser Nd:YAG pulsado com comprimento de onda de 1,06 µm, potência de cerca de 400 W, velocidade de soldagem de 6 mm/s e foco do feixe ajustado na superfície das chapas, conforme Ventrella et al. (2010) e Esfahani *et al.* (2015). A atmosfera protetora empregada foi de argônio (99,99 %) com vazão de 15 L/min, assegurando proteção contra oxidação e estabilidade do feixe, conforme recomendação de Klimpel (2024).

A condição experimental da soldagem a laser pulsado é mostrada na Tabela 1. Foram utilizadas três amostras para a condição soldada e três para a condição não soldada (metal base), totalizando seis corpos de prova. Essa duplicidade de condições permitiu comparar a microestrutura e as propriedades mecânicas do aço AISI 409 antes e após o processo de soldagem a laser. Todas as análises — metalográficas, microdureza, difratometria de raios X (DRX) e ferritoscopia magnética — foram conduzidas de forma independente em cada amostra, assegurando a reprodutibilidade e a significância estatística dos resultados.

Segundo Gu *et al.* (2023), o controle do diâmetro do feixe e da potência aplicada é essencial para “promover a formação de cordões homogêneos e reduzir tensões residuais”, o que fundamentou a escolha dos parâmetros empregados neste trabalho. A geometria do cordão e a penetração do feixe foram verificadas por análise visual e medição transversal, garantindo o alinhamento do feixe e o controle do aporte térmico, aspecto destacado como determinante na soldagem de aços ferríticos (Souza *et al.*, 2017).

Para assegurar a confiabilidade dos resultados e a reprodutibilidade das análises, todos os ensaios metalográficos, microdureza e difratometria de raios X foram realizados em triplicata para cada condição experimental. As médias apresentadas representam o valor central obtido entre as três repetições, acompanhadas do respectivo desvio-padrão e intervalo de confiança de 95 %.

Tabela 1 – Condições experimentais do processo de soldagem a laser utilizadas nas amostras de aço inoxidável ferrítico AISI 409.

PARÂMETRO	VALOR EXPERIMENTAL
Tipo de junta	Junta de topo
Regime de soldagem	Penetração profunda (keyhole)
Potência do laser	400 W
Diâmetro do raio incidente	2,5 mm
Distância focal	3,8 mm
Velocidade de soldagem	6 mm/s
Gás de proteção	Argônio 4.6 (99,996% de pureza)
Espessura das chapas	4 mm

Fonte: Dados dos autores (2025).

Após a soldagem, as amostras foram seccionadas transversalmente ao cordão, incorporadas em resina fenólica e preparadas para caracterização metalográfica segundo a norma ASTM E3. O polimento foi realizado com pastas de diamante até 1 μm e o ataque químico com reagente de Vilella (1 g de ácido pícrico, 5 mL de HCl e 100 mL de etanol PA), conforme metodologia descrita por Moraes *et al.* (2022).

As análises microestruturais foram conduzidas por microscopia óptica (MO). Algumas regiões específicas foram analisadas com microscopia eletrônica de varredura (MEV) equipada com espectroscopia de energia dispersiva (EDS), para identificação dos constituintes de fase e detecção de carbeto.

A análise de fases cristalinas foi realizada por difratometria de raios X (DRX) com radiação Cu K α ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$), utilizando varredura ampliada de $30^\circ \leq 2\theta \leq 160^\circ$ e passo de $0,02^\circ$, de modo a permitir a correta identificação e indexação dos picos de difração associados às fases ferrítica (estrutura cúbica de corpo centrado – CCC) e martensítica. A interpretação dos difratogramas e a identificação das fases cristalinas foram realizadas com base nos arquivos do

Joint Committee on Powder Diffraction–International Centre for Diffraction Data (ICDD), bem como com o auxílio do software X’Pert Quantify, conforme descrito na literatura especializada (ICDD, 2025; Nascimento; Teixeira, 2024; PANALYTICAL, 2024; Berton, 2014).

A fração volumétrica de ferrita foi determinada por ferritoscopia magnética conforme a norma AWS A4.2M:2020, de modo a correlacionar a distribuição das fases com as diferentes regiões do cordão: metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF). Essa abordagem é coerente com estudos recentes sobre a estabilidade estrutural de aços inoxidáveis ferríticos submetidos a processos de soldagem de alta densidade energética (Morais *et al.*, 2021).

Microdureza Vickers (perfil transversal). Para quantificar o efeito do ciclo térmico sobre o encruamento local e a transformação de fase, determinou-se a microdureza Vickers segundo ASTM E384 e ISO 6507-1. Utilizou-se carga 200 gramas-força ($HV_{0,2}$), tempo de aplicação 10 s, ponta calibrada e correção de máquina antes de cada série. Foi traçado perfil de dureza transversal do MB $\rightarrow$ ZTA $\rightarrow$ ZF $\rightarrow$ ZTA $\rightarrow$ MB, com passo de 0,25 mm na ZF/ZTA e 0,50 mm no MB, assegurando espaçamento ≥ 3 marcas de distância entre indentações para evitar sobreposição de zonas deformadas plasticamente (ASTM E384, 2020; ISO 9015-2, 2016). Em cada região (MB, ZTA e ZF) realizaram-se no mínimo 15 indentações distribuídas, reportando-se média $\pm$ desvio-padrão e intervalo de confiança de 95 %. A dureza foi correlacionada às fases identificadas (ferrita, martensita e precipitados ricos em Ti) e ao tamanho de grão ASTM (E112) medido em micrografias (método de interceptos).

Os dados (microestrutura, fases, frações e microdureza) foram interpretados à luz do gradiente térmico imposto pelo feixe laser e comparados com literatura recente em aços ferríticos soldados a laser, considerando refinamento de grão na ZF, martensita acicular e TiC disperso (Klimpel, 2024; Gu *et al.*, 2023; Moraes *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2017).

Análise dos dados e resultados

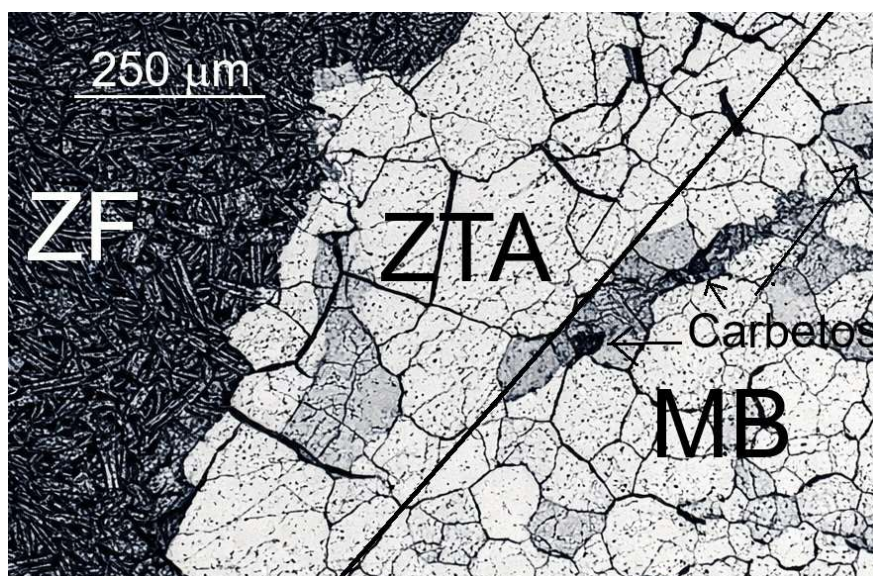
A avaliação dos resultados obtidos após o processo de soldagem a laser do aço inoxidável ferrítico AISI 409 permitiu compreender, de forma detalhada, a influência da fusão localizada sobre a microestrutura e as transformações de fase ocorridas nas diferentes regiões da junta soldada. As análises foram conduzidas com base em técnicas complementares de caracterização microestrutural e de fase, incluindo microscopia óptica (MO), microscopia

eletrônica de varredura (MEV) acoplada à espectroscopia de energia dispersiva (EDS), difratometria de raios X (DRX) e ferritoscopia magnética, conforme metodologia descrita anteriormente.

Esses procedimentos permitiram correlacionar as características morfológicas e químicas das regiões do metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF) com as condições térmicas impostas pelo feixe laser.

A micrografia óptica apresentada na Figura 2 evidencia que o metal base (MB) apresenta uma microestrutura predominantemente ferrítica (fase α), composta por grãos equiaxiais homogêneos e bem definidos, típica de aços inoxidáveis estabilizados por titânio. Essa morfologia reflete a ausência de deformações térmicas e confirma a estabilidade estrutural do material antes da soldagem, atuando como referência para comparação das modificações induzidas pelo processo.

Figura 02: Micrografia óptica do aço inoxidável AISI 409 evidenciando as regiões características da junta soldada: metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF).



Fonte: Dados dos autores (2025).

De acordo com Souza *et al.* (2017, p. 1673), “a precipitação de TiC e Ti(C,N) é característica dos aços ferríticos estabilizados e exerce papel importante na resistência à corrosão localizada e na estabilidade da fase α durante o aquecimento”.

Essas partículas, além de atuarem como nucleantes de grão ferrítico, contribuem para a redução da mobilidade de discordâncias e, conseqüentemente, para o aumento da dureza local e da resistência à corrosão intergranular, conforme corroborado por Moraes, Corrêa e Lopes (2022).

A presença de pequenas partículas escuras dispersas nas fronteiras de grão foi confirmada posteriormente por MEV/EDS (Figura 3), as quais revelaram teores de titânio e carbono, caracterizando carbeto do tipo TiC. Segundo Berton (2014), esses precipitados apresentam alta estabilidade química e desempenham papel relevante como refinadores de grão, melhorando a resistência à corrosão localizada e a tenacidade do aço em ambientes oxidantes.

Dessa forma, o comportamento do metal base observou-se consistente com a literatura especializada, indicando que o AISI 409 estabilizado por Ti mantém estrutura ferrítica estável, baixa sensibilidade à fragilização térmica e distribuição homogênea de precipitados, fatores que favorecem a integridade metalúrgica durante a soldagem a laser.

A zona termicamente afetada (ZTA) apresentada na Figura 2 exibiu uma faixa estreita, de aproximadamente 300 μm , caracterizada por crescimento moderado de grão ferrítico e ausência de transformações significativas de fase. Essa largura foi determinada por medição direta utilizando régua eletrônica do programa de processamento de imagens acoplado ao microscópio óptico, o que possibilitou quantificar a extensão térmica da região afetada com precisão micrométrica. Essa configuração confirma o baixo aporte térmico e a alta taxa de resfriamento inerentes ao processo de soldagem a laser.

Embora não tenha sido observada transformação completa de fase na zona termicamente afetada (ZTA), os valores elevados de microdureza indicam a ocorrência de transformação parcial para martensita e/ou endurecimento térmico associado ao gradiente térmico imposto pelo feixe laser. Conforme evidenciado na Figura 2, a ZTA apresenta crescimento moderado de grão ferrítico, porém sem alterações morfológicas suficientes para caracterizar uma transformação de fase completa, o que é compatível com os valores intermediários de microdureza registrados nessa região (Tabela 2). Esse comportamento é coerente com o perfil térmico altamente concentrado da soldagem a laser, caracterizado por elevadas taxas de

aquecimento e resfriamento, capazes de induzir transformações microestruturais localizadas e aumento de dureza mesmo em regiões predominantemente ferríticas, conforme discutido por Lacerda (2007) e Klimpel (2024).

Na zona fundida (ZF), também representada na Figura 2, observou-se uma microestrutura predominantemente martensítica, de morfologia acicular fina e grãos refinados. Essa configuração resulta da solidificação rápida seguida de transformação não difusional durante o resfriamento. A elevada densidade de energia do feixe laser, associada à curta duração do ciclo térmico, promoveu nucleação intensa e crescimento limitado dos cristais, favorecendo a formação localizada de martensita de alto teor de dureza. Resultados análogos foram relatados por Gu *et al.* (2023), que identificaram o mesmo comportamento em juntas soldadas de aços ferríticos processadas sob altas densidades de energia, nas quais a transformação martensítica se restringe à zona fundida, preservando a ferrita do metal base.

A formação de martensita na zona fundida (ZF), observada nas micrografias ópticas apresentadas na Figura 2 e corroborada pelo aumento expressivo da microdureza indicado na Tabela 2 e no Gráfico 2, está associada principalmente à elevada taxa de resfriamento imposta pelo processo de soldagem a laser. Esse resfriamento rápido favorece a transformação não difusional da ferrita presente no aço inoxidável ferrítico AISI 409, resultando na formação de martensita acicular fina, característica de processos de alta densidade de energia.

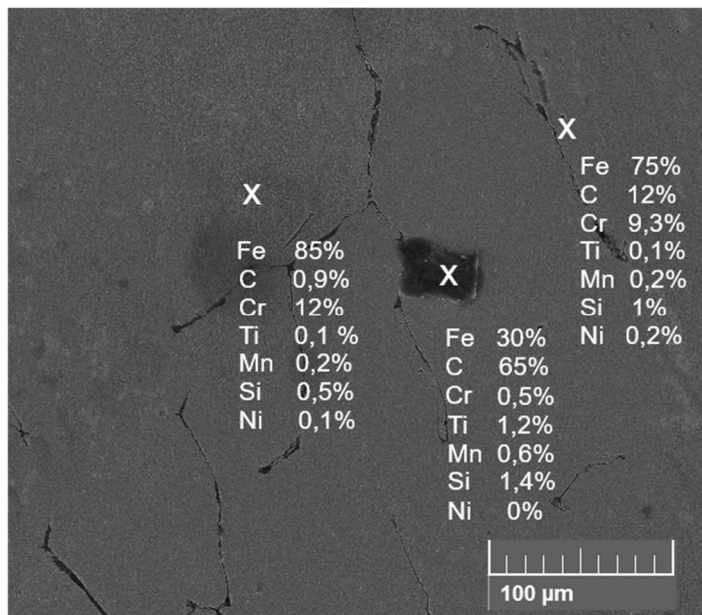
Embora tenha sido utilizado argônio comercial como gás de proteção durante a soldagem, não foram realizadas análises químicas quantitativas ou mapeamentos por EDS na zona fundida que permitam comprovar eventual enriquecimento local de carbono em relação ao metal base. Ressalta-se que a Figura 3, que apresenta análise por MEV/EDS, refere-se exclusivamente ao metal base, não fornecendo informações diretas sobre a composição química da zona fundida. Dessa forma, qualquer contribuição de impurezas residuais do gás de proteção para o enriquecimento local de carbono deve ser considerada apenas como hipótese secundária, e não como conclusão deste estudo.

Os resultados indicam, assim, que a cinética térmica associada ao elevado gradiente térmico e à rápida solidificação do processo *Laser Beam Welding* (LBW) constitui o principal fator responsável pela formação de martensita na zona fundida, em concordância com observações reportadas na literatura para a soldagem a laser de aços inoxidáveis ferríticos (Lacerda, 2007; Klimpel, 2024).

As análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiram identificar a presença de pequenas partículas escuras no metal base, posteriormente examinadas por espectroscopia de energia dispersiva (EDS), conforme mostrado na Figura 3. As análises químicas revelaram altos teores de carbono e traços de titânio, indicando a formação de carbeto de titânio (TiC). Segundo Berton (2014, p. 73), esses precipitados “atuam como agentes refinadores de grão e aumentam a resistência à corrosão devido à estabilidade química do titânio em ambientes oxidantes”.

Tais observações são coerentes com os resultados de Moraes, Corrêa e Lopes (2022), que associaram a presença de TiC dispersos à redução da mobilidade de discordâncias e, conseqüentemente, à elevação da dureza local. Dessa forma, a precipitação controlada de carbeto de titânio no metal base contribui para a estabilidade microestrutural e para o desempenho mecânico global da junta soldada.

Figura 03: Micrografia eletrônica com análise química por EDS do aço inoxidável AISI 409 no metal base.

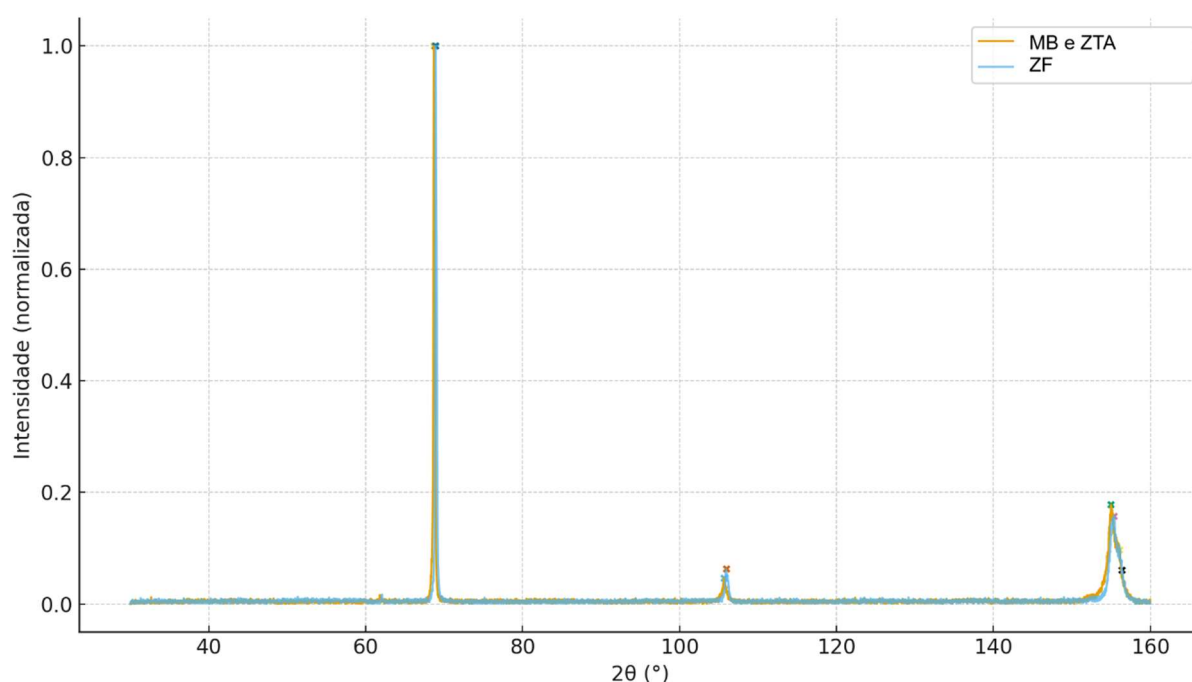


Fonte: Dados dos autores (2025).

O ensaio de difratometria de raios X (DRX) foi conduzido em duas amostras representativas da junta soldada, correspondente ao metal base com zona termicamente afetada (MB + ZTA), e a zona fundida (ZF). Os difratogramas obtidos, apresentados no Gráfico 1,

revelaram variações sutis nas posições e intensidades dos picos, refletindo as diferenças microestruturais entre as regiões analisadas.

Gráfico 1 – Difratogramas de raios X do metal base com zona termicamente afetada (MB + ZTA) e da zona fundida (ZF) do aço inoxidável AISI 409.



Fonte: Dados dos autores (2025).

A amostra de MB + ZTA apresentou picos de difração característicos da fase ferrítica (α -Fe), com máximos de intensidade nos planos cristalográficos (110), (200) e (211), correspondentes a ângulos médios de 68,69°, 105,63° e 154,97°, respectivamente. Esses valores confirmam a estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) típica da ferrita e evidenciam que o baixo aporte térmico do processo a laser preservou a fase original do aço AISI 409 nas regiões do metal base e da zona termicamente afetada.

Na amostra da zona fundida (ZF), observou-se o deslocamento dos picos principais para 68,91°, 105,93° e 155,35°, acompanhado de redução relativa na intensidade dos picos de ferrita e aparecimento de ombros secundários em torno de 156°, com intensidades próximas a 190 unidades. Essas pequenas variações angulares e de intensidade são compatíveis com a presença

de martensita tetragonal, formada durante a solidificação e o resfriamento rápido da zona fundida. Esse deslocamento é atribuído à distensão de rede e variação dos parâmetros cristalinos, associadas à transformação não difusional da ferrita cúbica para martensita tetragonal, fenômeno amplamente relatado em aços ferríticos soldados por feixe de laser (Morais *et al.*, 2021; Klimpel, 2024).

Os resultados de DRX, portanto, confirmam que o metal base e a ZTA mantêm estrutura ferrítica estável, enquanto a zona fundida apresenta fração martensítica significativa, em concordância com as observações micrográficas e com o aumento de dureza medido na ZF. Essa correlação entre os padrões de difração, a microestrutura e a dureza evidenciam o controle térmico eficiente do processo de soldagem a laser, capaz de restringir a transformação martensítica à região fundida e preservar a integridade metalúrgica da junta.

A quantificação da fração volumétrica de ferrita (δ -ferrita) foi realizada por ferritoscopia magnética, em conformidade com a norma AWS A4.2M:2020 (ISO 8249:2018 MOD). Os resultados, apresentados na Tabela 2, indicaram $82 \% \pm 7 \%$ de ferrita no metal base (MB), $72 \% \pm 12 \%$ na zona termicamente afetada (ZTA) e $52 \% \pm 18 \%$ na zona fundida (ZF).

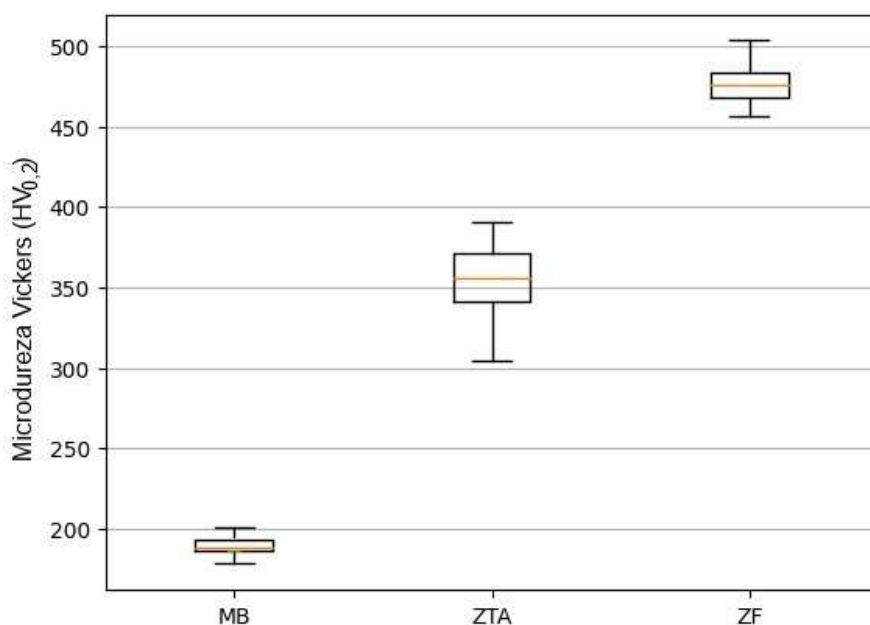
Os valores obtidos por ferritoscopia magnética foram utilizados como indicadores comparativos de resposta magnética relativa entre as regiões da junta soldada. Ressalta-se que, embora tanto a ferrita quanto a martensita sejam fases ferromagnéticas, a ferrita apresenta resposta magnética mais intensa e estável, enquanto a martensita, devido à sua estrutura tetragonal distorcida e maior densidade de defeitos cristalinos, pode apresentar resposta magnética diferenciada. Dessa forma, a presença de martensita limita a interpretação direta desses valores como fração volumétrica absoluta de ferrita. Ainda assim, os resultados evidenciam uma redução gradual da resposta magnética associada à ferrita em direção à zona fundida, o que confirma a formação progressiva de martensita nas regiões submetidas a maiores gradientes térmicos.

A distribuição observada está em conformidade com o equilíbrio de fases previsto para o aço AISI 409 e reforça a eficiência do processo de soldagem a laser em restringir a extensão térmica da ZTA, mantendo a microestrutura ferrítica estável no metal base (Klimpel, 2024).

A distribuição da microdureza Vickers (HV0,2) ao longo da junta soldada é apresentada no Gráfico 2, em função da posição transversal (mm), com indicação das regiões de metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF), incluindo barras de erro

correspondentes ao intervalo de confiança de 95 %. A Tabela 2 apresenta, de forma complementar, os valores médios de microdureza obtidos em cada região. O metal base apresentou 185 ± 7 HV, a ZTA atingiu 350 ± 18 HV e a zona fundida (ZF) alcançou 480 ± 12 HV, caracterizando um aumento acentuado da dureza transversal associado à redução do teor de ferrita.

Gráfico 2 – Boxplot da microdureza Vickers (HV_{0,2}) nas diferentes regiões da junta soldada a laser do aço inoxidável ferrítico AISI 409: metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF).



Fonte: Dados dos autores (2025).

Essa correlação inversa entre dureza e fração de ferrita, evidenciada pela Tabela 2, demonstra a influência direta do ciclo térmico e da cinética de solidificação sobre a evolução microestrutural da junta. Os resultados refletem a maior resistência mecânica associada à formação de martensita na ZF e o comportamento mais dúctil das regiões ferríticas adjacentes.

O aumento intermediário de dureza na ZTA, embora inferior ao da ZF, sugere a presença de martensita parcial e de zonas encruadas decorrentes da rápida variação de temperatura e do acúmulo de tensões térmicas residuais. Tal comportamento é coerente com o perfil térmico

concentrado do feixe laser, caracterizado por resfriamento rápido e gradiente localizado, e representa uma transição gradual entre rigidez e ductilidade ao longo da junta - condição desejável para aplicações automotivas e estruturais, nas quais a integridade metalúrgica e o controle da tenacidade são essenciais.

O tamanho de grão ferrítico foi determinado pelo método de interceptos lineares, conforme a norma ASTM E112, a partir da análise de dez micrografias representativas do metal base (MB) e de cinco imagens obtidas nas regiões próximas à ZTA. O número de grão ASTM (G) médio obtido foi de $7,5 \pm 0,3$ no metal base, correspondente a um diâmetro médio de grão ferrítico de aproximadamente $19 \mu\text{m}$, e de $6,0 \pm 0,4$ nas regiões adjacentes à zona fundida (ZF), equivalendo a um diâmetro médio de cerca de $32 \mu\text{m}$. Essa diferença moderada reflete o efeito térmico localizado do feixe laser, responsável por um crescimento de grão discreto na ZTA, sem perda de homogeneidade microestrutural e sem evidência de coalescimento significativo de ferrita.

Tabela 2 – Valores médios de microdureza Vickers (HV_{0,2}) e de fração volumétrica de ferrita obtidos nas diferentes regiões da junta soldada do aço AISI 409.

REGIÃO	MICRODUREZA VICKERS (HV)	TEOR DE FERRITA (%)
Metal Base (MB)	185 ± 7	82 ± 7
Zona Termicamente Afetada (ZTA)	350 ± 18	72 ± 12
Zona Fundida (ZF)	480 ± 12	52 ± 18

Fonte: Dados experimentais dos autores (2025).

As variações moderadas no tamanho de grão são comportamentos típicos em processos de soldagem a laser, devido ao gradiente térmico acentuado (Gu *et al.*, 2023). As regiões submetidas a resfriamento rápido tendem a preservar o refinamento microestrutural, enquanto o efeito de difusão térmica promove crescimento limitado de grão nas zonas de menor taxa de resfriamento, como a ZTA.

Essas observações são consistentes com os resultados obtidos neste estudo, em que a ZTA estreita ($\approx 300 \mu\text{m}$) indica eficiência térmica elevada e baixa distorção metalúrgica, comprovando o controle de energia característico do processo Laser Beam Welding (LBW).

De modo geral, o processo de soldagem a laser por penetração profunda (*keyhole*) demonstrou alta precisão térmica e metalúrgica, resultando em uma junta homogênea, limpa e mecanicamente consistente. A integridade da solda, associada à pequena largura da ZTA, confirma a eficiência do feixe laser em promover refinamento microestrutural e estabilidade ferrítica, mesmo sob condições intensas de gradiente térmico.

As correlações observadas entre fração de ferrita, dureza e morfologia de fase reforçam o potencial da soldagem a laser como tecnologia sustentável e de alto desempenho, superando os processos convencionais de arco elétrico. O método proporciona menor aporte térmico, maior eficiência energética, redução de deformações residuais e melhor controle da microestrutura final.

Os resultados indicam, ainda, que o ajuste criterioso dos parâmetros de soldagem — tais como potência do feixe, velocidade de avanço e composição da atmosfera protetora — é determinante para controlar o equilíbrio entre ferrita e martensita, assegurando juntas com elevada integridade metalúrgica e desempenho mecânico otimizado.

Considerações finais

O presente estudo permitiu responder à questão de pesquisa proposta, confirmando que o ciclo térmico associado à soldagem a laser exerce influência direta na evolução microestrutural e nas propriedades mecânicas do aço inoxidável ferrítico AISI 409. Os objetivos estabelecidos foram alcançados, uma vez que as análises microestruturais, associadas aos ensaios de microdureza e à difratometria de raios X, permitiram correlacionar as transformações de fase observadas nas diferentes regiões da junta soldada.

Os resultados evidenciaram que o processo de *Laser Beam Welding* (LBW) produz uma zona termicamente afetada estreita, característica do baixo aporte térmico e da elevada taxa de resfriamento. O metal base apresentou microestrutura predominantemente ferrítica, enquanto a zona fundida caracterizou-se pela formação de martensita acicular, associada ao rápido resfriamento após a solidificação. Essa transformação microestrutural resultou em aumento significativo da microdureza na região da zona fundida, atingindo valores superiores aos observados no metal base e na zona termicamente afetada.

A análise por difratometria de raios X confirmou a predominância da fase ferrítica nas regiões de metal base e na zona termicamente afetada, enquanto pequenas variações nos picos

de difração indicaram a presença de martensita na zona fundida. A quantificação da fração de ferrita por ferritoscopia magnética evidenciou uma redução progressiva da resposta magnética em direção à zona fundida, corroborando as observações microestruturais e os resultados de microdureza.

Os resultados demonstram que o controle adequado dos parâmetros de soldagem — particularmente da potência do feixe, da velocidade de avanço e da atmosfera de proteção — é fundamental para controlar a relação entre ferrita e martensita e garantir a integridade metalúrgica da junta soldada.

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se investigar a influência de diferentes regimes de potência do laser e de diferentes atmosferas protetoras na microestrutura e nas propriedades mecânicas do aço AISI 409, bem como avaliar o comportamento em fadiga e a resistência à corrosão das juntas soldadas obtidas por este processo.

Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio por meio da bolsa de Iniciação Científica, concedida no âmbito do Edital de Pesquisa UNIFEI 03/2025, destinada ao graduando participante deste estudo. Agradecem também ao Curso de Engenharia de Materiais – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pelo suporte acadêmico e técnico oferecido durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Referências

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS A4.2M:2020 (ISO 8249:2018 MOD)** – Standard procedures for calibrating magnetic instruments to measure the delta ferrite content of austenitic and duplex ferritic-austenitic stainless steel weld metal. 6. ed. Miami: American Welding Society, 2020. 60 p.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E112-13**: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E3-11**: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2011. 12 p. (Book of Standards, v. 03.01).

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E384-20**: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. West Conshohocken, PA: ASTM, 2020.

BERTON, E. M. **Efeito das temperaturas de têmpera e de revenido na resistência à corrosão da camada martensítica de alto nitrogênio produzida por SHTPN sobre o aço AISI 409**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais). Universidade Tecnológica Federal do Paraná (RIUT), Curitiba, 2014.

BEVILACQUA, M.; CIARAPICA, F.; FORCELLESE, A.; SIMONCINI, M. Comparison among the environmental impact of solid state and fusion welding processes in joining an aluminium alloy. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, Londres, v. 234, n. 1-2, p. 140-156, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0954405419845572>.

BORGES, Bianca Freitas; DE RESENDE, André Alves. Friction Stir Welding (FSW): sustentabilidade e perspectivas futuras na união de metais. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, Itapetininga, v. 12, p. e025029, 2025. Disponível em: <https://periodicoscientificos.itp.ifsp.edu.br/index.php/rbic/article/view/2419>.

BRASIL. MEC. CAPES. **III Plano Nacional de Pós-Graduação (1986-1989)**. Brasília, 1986. Disponível em: http://www.capes.gov.br/images/stories/download/editais/III_PNPG.pdf. Acesso em: 01 de junho de 2019.

CASARIN, S. J. **Manufatura mecânica: soldagem**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2018.

COELHO, B. N.; LIMA, M. S. F.; COSTA, A. R. Soldagem do aço inoxidável AISI 316 com laser à fibra de alta potência: influência dos parâmetros operacionais na microdureza e na susceptibilidade à corrosão eletrolítica dos cordões de solda. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 3, p. 1338–1349, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-70762013000300002>.

ESFAHANI, M. R. N.; COUPLAND, J.; MARIMUTHU, S. Microstructural and mechanical characterization of laser-welded high-carbon and stainless steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Londres, v. 80, n. 5–8, p. 1449–1456, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7111-5>.

GU, L. et al. Improving plasticity of ferritic stainless steel welded joints by varying laser beam spot diameter. **Materials**, Basileia, v. 16, n. 14, art. 5230, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma14112072>.

ICCD. INTERNATIONAL CENTRE FOR DIFFRACTION DATA. **PDF Database Products 2025–2026**. Newtown Square, Pensilvânia: ICCD, 2025.

ISO. **ISO 6507-1:2018**: Metallic materials — Vickers hardness test — Part 1: Test method. Geneva: ISO, 2018.

ISO. **ISO 9015-2:2016** - Destructive tests on welds in metallic materials — Hardness testing — Part 2: Microhardness testing of welded joints. Geneva: ISO, 2016.

KLIMPEL, A. Review and Analysis of Modern Laser Beam Welding. **Materials**, Basileia, v. 17, n. 18, art. 4657, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma17184657>.

LACERDA, J. C. **Efeito do aporte térmico e adição de nitrogênio no gás de proteção na transição dúctil-frágil de um aço inoxidável AISI 409 soldado pelo processo GMAW**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. **Welding metallurgy and weldability of stainless steels**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. **Introdução aos Processos de Soldagem**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Metalúrgica, 2000.

MORAIS, F. L. D.; CORRÊA, E. C. S.; LOPES, W. Effect of shear direction on work-hardening evolution of AISI 409 steel under rolling/shearing loading. **Materials Research**, São Carlos, v. 25, e20210398, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0398>.

MORAIS, F. L. D.; CORRÊA, E. C. S.; LOPES, W. Estudo da conformabilidade do aço inoxidável AISI 409 sob rotas complexas de deformação. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 18, e2336, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.20212336>.

NASCIMENTO, Matheus Felipe Theodoro; TEIXEIRA, Ricardo Luiz Perez. Influência do jateamento com microesferas de vidro nas propriedades superficiais do aço inoxidável AISI 316L grau ASTM F138. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, Itapetininga, v. 11, p. e024043, 2024. Disponível em: <https://periodicoscientificos.itp.ifsp.edu.br/index.php/rbic/article/view/1628>.

PANALYTICAL. **X'Pert Quantify**: quantitative phase analysis software for X-ray diffraction applications. Almelo: PANalytical, 2024.

ROMINIYI, Azeez Lawan; MASHININI, Peter Madindwa. A critical review of microstructure and mechanical properties of laser-welded similar and dissimilar titanium alloy joints. **Journal of Advanced Joining Processes**, Amsterdã, v. 9, p. 100191, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2024.100191>.

SOUZA, J. S. et al. Electrochemical study of the AISI 409 ferritic stainless steel: passive film stability and pitting nucleation and growth. **Materials Research**, São Carlos, v. 20, n. 6, p. 1669–1680, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0204>.

VENTRELLA, V. A.; BERRETTA, J. R.; ROSSI, W. Influência da energia de soldagem em uniões de lâminas finas através de laser pulsado de Nd:YAG. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 15, n. 4, p. 265–272, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-92242010000400003>.

ZHANG, Binbin et al. Research on the laser welding process and performance analysis of SiCp/Al composite and 2A14 aluminum alloy dissimilar metals. **Journal of Manufacturing Processes**, Londres, v. 125, p. 239–252, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.06.025>.