

**INFLUÊNCIA DO TIPO DE ALIMENTAÇÃO NO PROCESSO GTAW  
AUTOMÁTICO SOBRE A MICROESTRUTURA DO AÇO SAE 1020  
INFLUENCE OF FEEDING TYPE IN THE AUTOMATED GTAW PROCESS ON THE  
MICROSTRUCTURE OF SAE 1020 STEEL**

**Luís Gustavo Capello<sup>1</sup>  
Edgar de Souza Dutra<sup>2</sup>  
Nasareno das Neves<sup>3</sup>  
Felipe Carneiro da Silva<sup>4</sup>  
Cleber Marques<sup>5</sup>**

**RESUMO:** O processo de soldagem *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) é amplamente reconhecido pela elevada qualidade metalúrgica e pelo controle térmico proporcionado. Com a evolução dos sistemas de alimentação de material de adição, surgem variações como a alimentação contínua (C-GTAW) e a dinâmica GTAW-DWF (*Dynamic Wire Feed*), que introduz uma dinâmica controlada no fornecimento do arame. Este estudo, fundamentado na tese de doutorado de Neves (2022), investigou a influência da frequência de alimentação dinâmica no processo GTAW automático, evidenciando diferenças significativas entre os modos contínuo e dinâmico. O presente trabalho apresenta um comparativo técnico entre ambos, com foco na análise microestrutural da zona fundida e da zona afetada pelo calor. São discutidos aspectos como taxa de resfriamento, morfologia dos grãos, diluição, estabilidade do arco e influência no controle térmico. Os resultados indicam que o processo GTAW-DWF proporciona refinamento microestrutural superior e maior controle do aporte térmico, contribuindo para melhores propriedades mecânicas e repetibilidade do processo.

**Palavras-chave:** Acicular, Ferrita, Microestrutura, Perlita, Soldagem, Widmanstätten,

**ABSTRACT:** The Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) process is widely recognized for its high metallurgical quality and thermal control. With the evolution of filler material feeding systems, variations such as continuous feeding (C-GTAW) and dynamic wire feeding GTAW-DWF (Dynamic Wire Feed) have emerged, introducing controlled wire motion during the process. This study, based on the doctoral thesis of Neves (2022), investigated the influence of dynamic wire feeding frequency in the automated GTAW process, highlighting significant differences between continuous and dynamic modes. The present work presents a technical comparison between both processes, focusing on the microstructural analysis of the fusion zone and heat-affected zone. Aspects such as cooling rate, grain morphology, dilution, arc stability, and influence on thermal control are discussed. The results indicate that the GTAW-DWF process provides superior microstructural refinement and greater heat input control, contributing to improved mechanical properties and process repeatability.

**Keywords:** Acicular, Ferrite, Microstructure, Pearlite, Welding, Widmanstätten.

Tecnólogo Mecânico: Processos de Soldagem – Faculdade de Tecnologia de Itaquera “Miguel Reale”

E-mail: [luiz.capello@fatec.sp.gov.br](mailto:luiz.capello@fatec.sp.gov.br)<sup>1</sup>

Mestre em Processos Industriais – Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC SP

E-mail: [edgar.dutra@cps.sp.gov.br](mailto:edgar.dutra@cps.sp.gov.br)<sup>2</sup>

Doutor em Eng. Mecânica – Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC SP

E-mail: [nasareno.neves@cps.sp.gov.br](mailto:nasareno.neves@cps.sp.gov.br)<sup>3</sup>

Doutor em Eng. Metalúrgica – Faculdade de Tecnologia de Cotia – FATEC Cotia

E-mail: [fcarneirosilva@fatec.sp.gov.br](mailto:fcarneirosilva@fatec.sp.gov.br)<sup>4</sup>

Doutor em Eng. Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina - LABSOLDA – Departamento de Engenharia Mecânica, E-mail: [c.marques@posgrad.ufsc.br](mailto:c.marques@posgrad.ufsc.br)<sup>5</sup>

## 1 INTRODUÇÃO

A soldagem por arco com eletrodo não consumível, conhecida como *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), destaca-se pela elevada qualidade metalúrgica, sendo amplamente utilizada em aplicações que exigem alto controle do aporte térmico e elevada integridade estrutural. Tradicionalmente, o material de adição é introduzido manualmente ou por meio da alimentação contínua, ou *Continuous GTAW* (C-GTAW), o que pode limitar o controle da transferência metálica, da estabilidade da poça de fusão e da uniformidade térmica ao longo do cordão de solda.

Com os avanços tecnológicos, surgiram sistemas automatizados mais sofisticados, como o *GTAW Dynamic Wire Feed* (GTAW-DWF) nos quais a alimentação do arame ocorre de forma dinâmica e sincronizada com o arco elétrico. Essa abordagem possibilita maior controle do processo, reduzindo variações térmicas, favorecendo a estabilidade do arco e promovendo melhorias na qualidade metalúrgica da junta soldada.

Nesse contexto, a análise metalográfica assume papel fundamental na compreensão dos fenômenos envolvidos na soldagem, uma vez que permite correlacionar as condições térmicas do processo com a formação das fases, a morfologia dos grãos e a evolução microestrutural nas regiões da zona fundida (ZF) e da zona afetada pelo calor (ZAC).

A caracterização microestrutural é, portanto, essencial para interpretar o comportamento metalúrgico do material soldado, bem como prever seu desempenho mecânico e sua confiabilidade em serviço. Estudos recentes, como o de Neves (2022), demonstram que a variação da frequência de alimentação dinâmica influencia diretamente a microestrutura e o comportamento metalúrgico e mecânico do material soldado.

Diante desse contexto, torna-se relevante investigar os efeitos desses diferentes modos de alimentação na microestrutura da solda, uma vez que tais características influenciam diretamente as propriedades mecânicas e o desempenho em serviço da junta soldada.

O presente trabalho, tem por objetivo, realizar um comparativo entre as variantes dos processos C-GTAW e GTAW-DWF com foco na análise microestrutural da zona fundida e zona afetada pelo calor.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 METAL DE BASE

O metal de base utilizado corresponde ao aço carbono estrutural conforme a *Society of Automotive Engineers* (SAE) classificação SAE 1020, de acordo com a norma SAE J403:2024 (UNS: G10200) e classificado comercialmente, segundo o sistema da *American Iron and Steel Institute* (AISI).

Esse aço é apresenta baixo teor de carbono, cerca de 0,20%, boa soldabilidade e conformabilidade, sendo amplamente empregado em componentes mecânicos como eixos, engrenagens e estruturas metálicas.

A equivalência composicional foi adotada com base na norma SAE J403:2024 e correlacionada por meio do *American Society For Testing And Materials* por sua norma ASTM DS67B — *Handbook of Comparative World Steel Standards*, permitindo relacionar diferentes sistemas normativos com base na composição química dos aços certificados.

As propriedades mecânicas e a composição química encontram-se apresentados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

**Tabela 1 – Composição química do aço com especificação SAE J403:2024**

| Designação | Grau | %C   | %Mn  | %Si | %P     | %S     | Cr  | Ni  | Mo  |
|------------|------|------|------|-----|--------|--------|-----|-----|-----|
| SAE 1020   | 1020 | 0,18 | 0,30 | --- | ≤ 0,04 | ≤ 0,05 | --- | --- | --- |
|            |      | —    | —    |     |        |        |     |     |     |
|            |      | 0,23 | 0,60 |     |        |        |     |     |     |

Fonte: Adaptado de ArcelorMittal (2026).

**Tabela 2 – Propriedades mecânicas do aço com especificação SAE J403:2024**

| Designação | Propriedades         | Valores |
|------------|----------------------|---------|
| SAE 1020   | Resistência a Tração | 380 MPa |
|            | Limite de Escoamento | 210 MPa |
|            | Alongamento          | 25%     |
|            | Dureza Brinell       | 111     |

Fonte: Adaptado de ArcelorMittal (2026).

## 2.2 CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM

Para as variantes do processo (C-GTAW e GTAW-DWF) utilizou-se os mesmos consumíveis, gás de proteção conforme detalhados a seguir.

### 2.2.1 Arame sólido

O material de adição utilizado nesta pesquisa, foi o arame com a classificação ER70S-6, bitola de 1,2 mm de diâmetro, especificado no código ASME II – Parte C – SFA 5.18 (2025). A composição química e as propriedades mecânicas do material, encontram-se apresentadas nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

**Tabela 3 – Composição química do ER70S-6**

| Designação | %C                | %Mn               | %Si               | %P    | %S    | Ni   | %Cr  | %Mo  | %V   | %Cu           |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------|-------|------|------|------|------|---------------|
| ER70S-6    | 0,06<br>-<br>0,15 | 1,40<br>-<br>1,85 | 0,80<br>-<br>1,15 | 0,025 | 0,035 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,03 | 0,50<br>(máx) |

Fonte: Adaptado de ASME II Parte C - SFA 5.18 (2025).

**Tabela 4 – Propriedades mecânicas do ER70S-6**

| Propriedades         | Requisitos |
|----------------------|------------|
| Resistência a Tração | 480 MPa    |
| Limite de Escoamento | 400 MPa    |
| Alongamento          | 22%        |

Fonte: Adaptado de ASME II Parte C - SFA 5.18 (2025).

### 2.2.2 Eletrodo de tungstênio

O processo GTAW baseia-se na geração de um arco elétrico entre o metal de base e um eletrodo de tungstênio não consumível, sob atmosfera de proteção gasosa inerte, geralmente composta por argônio, hélio ou suas misturas. Apesar do desgaste natural durante a operação, o eletrodo não fornece material metálico à poça de fusão.

Para a execução dos ensaios, emprega-se o eletrodo EWTh-2 de 2,0 mm de diâmetro, constituído de tungstênio com adição de 2% de óxido de tório (ThO<sub>2</sub>),

conforme código ASME II Parte C especificação SFA 5.12 (2025), sendo amplamente utilizado devido à sua estabilidade de arco e desempenho térmico no processo GTAW.

### **2.2.3 Gás de proteção**

Para o experimento, utiliza-se o gás de proteção argônio com pureza de 99,99%, para os processos C-GTAW e GTAW-DWF, garantindo um ambiente adequado para a formação e a estabilidade do arco elétrico.

O processo GTAW é caracterizado pela formação de arco elétrico entre o eletrodo não consumível de tungstênio e o metal de base, sob proteção de gás inerte, como argônio ou hélio. Nesse processo, não há transferência metálica pelo arco, o que proporciona maior controle da soldagem. A utilização de gases inertes, como o argônio, proporciona elevada estabilidade do arco e maior limpeza da poça de fusão, reduzindo a presença de gases reativos e eliminando a formação de escória. Além disso, contribui para a diminuição dos níveis de hidrogênio no metal depositado, fator importante para a prevenção de defeitos metalúrgicos.

## **2.3 EQUIPAMENTOS E PROCESSOS**

### **2.3.1 Sistema e processo de soldagem**

Os cordões de solda foram realizados pelos processos C-GTAW e GTAW-DWF, utilizando o sistema automatizado Tartílope V2F com controle de tensão de arco (AVC), conforme ilustrado na Figura 1. Esse sistema possui movimentação motorizada em múltiplos eixos, garantindo estabilidade do arco durante a soldagem. A alimentação dinâmica do arame foi realizada por meio do módulo de alimentação dinâmica (MAD), modelo A7PMDAC, permitindo o controle da frequência e da amplitude do movimento do arame, por meio de integração com a fonte de soldagem. Os equipamentos utilizados contaram com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) através do projeto nº 2018/18904-7, da Fundação de Apoio à Tecnologia (FAT), o Laboratório de Soldagem da Universidade Federal de Santa Catarina (Labsolda-UFSC) e da empresa IMC Soldagem.

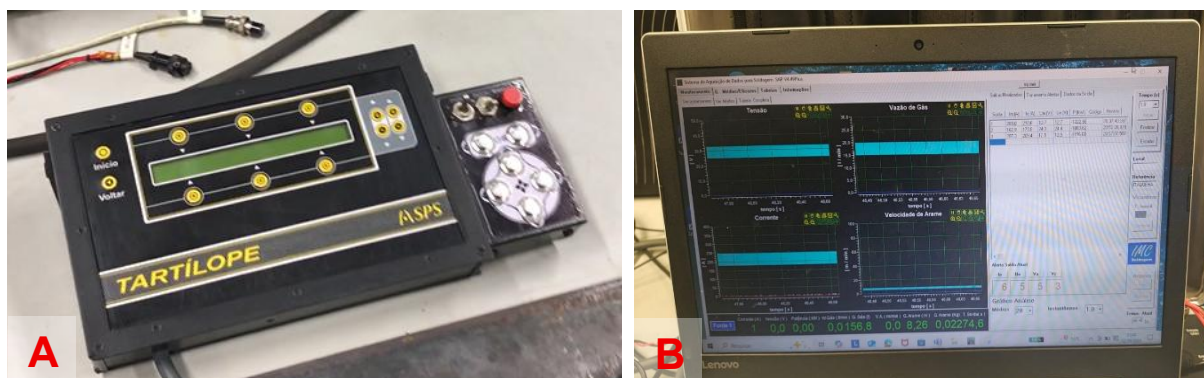
**Figura 1 – Componentes do sistema automatizado**



**Fonte:** Adaptado de Neves *et al* (2022) e Labsolda/SPS/UFSC (2019).  
**Nota:** (A) Tartilope V2F com eixo AVC; (B) módulo de alimentação dinâmica (MAD) modelo A7PMDAC.

O equipamento foi operado através de uma unidade de controle eletrônico externo da tocha de soldagem (Figura 2A), visando a programação do sentido de deslocamento, velocidade de soldagem, tipo de oscilação, além do acionamento da alimentação dinâmica. Para a coleta de dados em tempo real, foi utilizado o sistema de aquisição de parâmetros (SAP), conforme visualizado na Figura 2B, sendo possível verificar os parâmetros de soldagem, dentre eles, a tensão de arco (V), a corrente de soldagem (A), a velocidade de alimentação de arame (m/min.) e a vazão do gás de proteção (l/min.).

**Figura 2 – Sistema de controle e monitoramento**



**Fonte:** Autores (2026).  
**Nota:** (A) controle e joystick; (B) tela do sistema de aquisição de parâmetros de soldagem.

A Figura 3 apresenta a configuração experimental utilizada na soldagem GTAW automatizada. Na figura 3A, observa-se a integração entre a fonte de soldagem, o sistema automatizado Tartilope, o módulo de alimentação dinâmica (MAD), o sistema de monitoramento e a tocha GTAW com suporte do arame de adição. Já a Figura 3B, apresenta a configuração da alimentação de arame na forma radial com um ângulo

de inclinação de 60°, sendo o consumível posicionado a uma distância de 8 mm em relação ao eletrodo de tungstênio com 2% de tório e diâmetro de 3,2 mm.

**Figura 3 – Equipamento de soldagem**



**Fonte:** Autores (2026).

**Nota:** (A) bancada; (B) detalhe do Tartilope com a tocha de soldagem GTAW e suporte de arame.

## 2.4 PRODUÇÃO DAS CHAPAS TESTE

### 2.4.1 Parâmetros de soldagem

Os parâmetros de soldagem para ambos os processos GTAW, como a velocidade de alimentação do arame, a tensão do arco e o fluxo de gás de proteção, foram aplicados conforme as especificações estabelecidas individualmente para cada processo, sendo a nomenclatura C-GTAW, adotada para alimentação contínua e GTAW-DWF para alimentação dinâmica.

Os parâmetros de soldagem utilizados e monitorados nos experimentos, seguem os estudos de Neves (2022), para o aço estrutural conforme apresentado na Tabela 5, onde na especificação ASME II Parte C SFA-5.18, estes influenciam diretamente a estabilidade do arco, a transferência térmica e a qualidade da junta soldada.

As variáveis como corrente de soldagem (A), tensão de arco (V), velocidade de avanço (cm/min.) e vazão do gás de proteção (l/min.) afetam a penetração, a geometria do cordão e as transformações microestruturais da ZAC. O controle inadequado pode gerar defeitos e comprometer as propriedades mecânicas, tornando essencial o ajuste correto dos parâmetros para garantir a integridade da solda.

Tabela 5 – Parâmetros de soldagem adotados para C-GTAW e GTAW-DWF

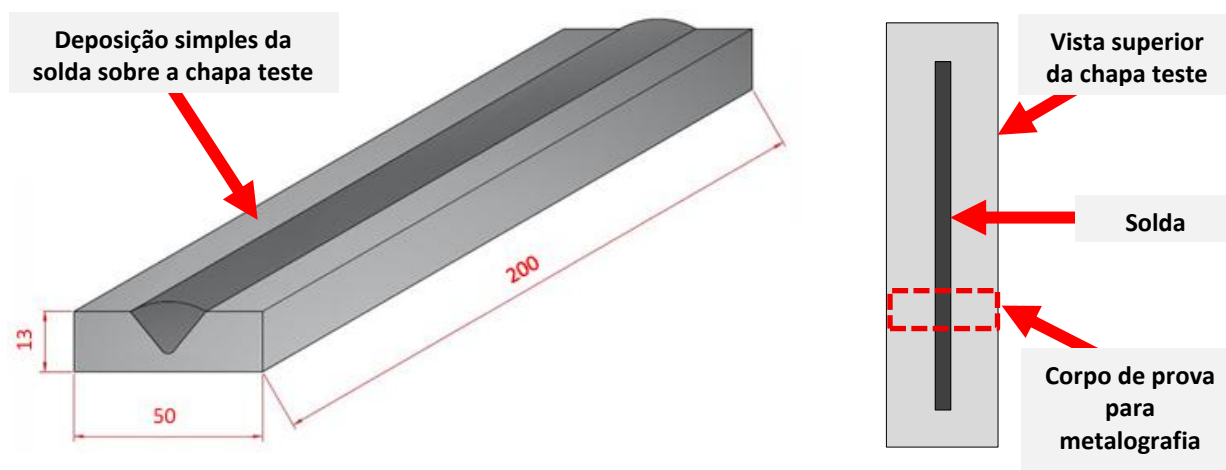
| Parâmetros                                 | C-GTAW        | GTAW-DWF      |
|--------------------------------------------|---------------|---------------|
| Corrente de soldagem (A)                   | 210           | 210           |
| Tensão do arco (V)                         | 13,5          | 13,5          |
| Velocidade de soldagem (cm/min)            | 13            | 13            |
| Vazão do gás Ar (l/min)                    | 12            | 12            |
| Eletrodo de tungstênio EWTh-2 (Ø mm)       | EWTh-2 Ø 3,2  | EWTh-2 Ø 3,2  |
| Material de adição ER70S 6 (Ø mm)          | Arame ER70S-6 | Arame ER70S-6 |
| Velocidade de alimentação do arame (m/min) | 1,5           | 1,5           |
| Avanço médio do arame (mm)                 | 4             | 4             |
| Ângulo do arame (°)                        | 60            | 60            |
| Distância arame x eletrodo (mm)            | 5             | 5             |
| Aporte térmico (kJ/cm)                     | 12,6          | 12,6          |
| Frequência de alimentação (Hz)             | ---           | 10            |
| Controle da tensão do arco (AVC) (mm)      | 12,5          | 12,5          |

Fonte: Adaptado de Neves (2022).

#### 2.4.2 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova (CPs) utilizados em ambos os processos, foram desenvolvidos para uma simples deposição sobre chapas de SAE 1020, sendo dimensionados para garantir uma análise de perfil de solda. A Figura 4, apresenta a preparação da chapa teste, bem como a geometria da solda e sua deposição.

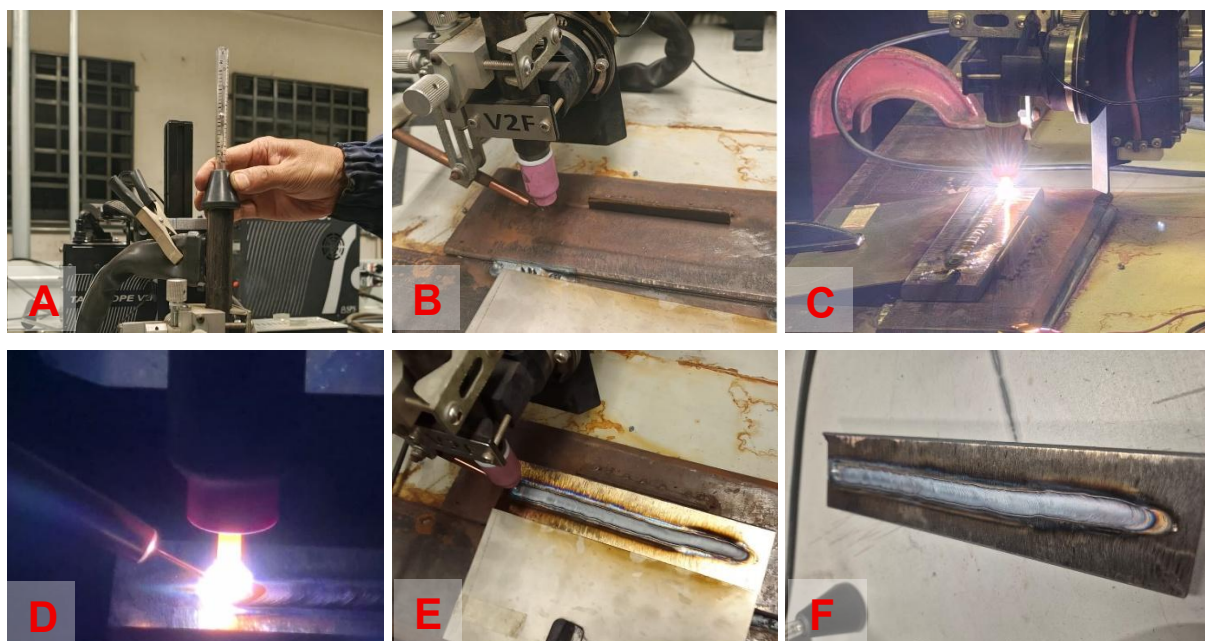
Figura 4 – Vista superior da chapa teste com deposição simples do cordão de solda



Fonte: Autores (2026).

O procedimento para a preparação da chapa teste foi iniciado com uma limpeza utilizando-se de uma esmerilhadeira, permitindo a deposição da solda sobre metal brilhante. As imagens contidas na Figura 5 apresentam as principais etapas de preparação, configuração e execução do processo de soldagem.

**Figura 5 – Execução da preparação dos corpos de prova**



**Fonte:** Autores (2026).

**Nota:** (A) checagem da vazão de gás; (B) programação on-line da trajetória da soldagem; (C) soldagem; (D) disposição do arame em relação à poça de fusão; (E) finalização da soldagem sobre a chapa teste e (F) chapa teste apresentada a deposição da solda.

### 2.4.3 Preparação e caracterizações das amostras

Durante a preparação e caracterização das amostras metálicas, seguem-se as recomendações das normas ASTM E3-11 — *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens* (2017), ASTM E45-05 — *Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel* (2025) e da American Welding Society (AWS D1.1M/D1.1:2025).

Na Figura 6, são apresentadas as etapas de preparação metalográfica das amostras, iniciando-se pelo corte da seção representativa com a serra fita industrial Franho modelo FMG 500, de modo a evitar alterações térmicas e mecânicas capazes de comprometer a integridade microestrutural. Posteriormente, realizam-se as etapas de lixamento e polimento com abrasivos de diferentes granulometrias, obtendo-se

superfícies com acabamento espelhado e adequadas para as análises macrográficas e micrográficas.

**Figura 6 – Etapas da preparação metalográfica das amostras**



**Fonte:** Autores (2026). Colaboração: (A) Laboratório de Soldagem Fatec Itaquera (2026); (B) Laboratório de Microscopia Fatec SP (2026).

**Nota:** (A) corte da seção transversal; (B) lixamento inicial; (C) polimento; (D) sequência de abrasivos utilizados; (E) acabamento espelhado das amostras preparadas para análise.

Posteriormente, realiza-se o ataque químico das amostras com solução de Nital 3% e 97% de álcool isopropílico, conforme apresentado na Figura 7, visando à revelação dos contornos de grão e das fases microestruturais.

A análise microestrutural é conduzida em microscópio óptico, permitindo observar fases presentes, contornos de grão e a zona termicamente afetada. Já a análise macroestrutural é realizada em estereoscópio, possibilitando avaliar a geometria do cordão de solda, penetração, fusão e eventuais discontinuidades. Para ambas as caracterizações, utiliza-se o software *ImageJ*.

**Figura 7 – Etapas e equipamentos utilizados na caracterização das amostras**



**Fonte:** Autores (2026). Colaboração: Laboratório de Microscopia Fatec Itaquera (2026).

**Nota:** (A) ataque químico com solução de Nital 3%; (B) microscópio óptico ZEISS Axion 10 utilizado na análise microestrutural; (C) estereoscópio ZEISS Axion empregado na análise macroestrutural.

#### 2.4.4 Critérios de análise

As análises foram conduzidas com base em referenciais normativos e literatura especializada, incluindo os autores Callister e Rethwisch (2019), Neves (2022), Vera *et al* (2022), Sarruf *et al* (2015), os quais abordam, respectivamente, procedimentos de preparação metalográfica e métodos de análise quantitativa de microestruturas.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 METALOGRAFIA

##### 3.1.1 Micrografias

A análise micrográfica consiste na caracterização detalhada da microestrutura de metais e ligas metálicas, sendo realizada por microscopia óptica ou eletrônica após adequada preparação metalográfica. Esse procedimento envolve etapas de lixamento, polimento e ataque químico, permitindo a revelação das fases constituintes, do tamanho de grão e dos efeitos térmicos decorrentes da soldagem, especialmente no metal de base (MB) e na zona afetada pelo calor (ZAC).

Segundo Callister e Rethwisch (2019), a micrografia é fundamental para compreender a relação entre microestrutura e propriedades mecânicas, uma vez que

características como tamanho de grão, morfologia das fases e presença de precipitados influenciam diretamente a resistência e a ductilidade dos materiais.

No contexto da soldagem, Chiaverini (2017) destaca que a micrografia permite identificar transformações metalúrgicas no cordão de solda e na ZAC, como a formação de martensita, ferrita, perlita e bainita, dependentes da composição química e das taxas de resfriamento. Além disso, possibilita a detecção de descontinuidades microscópicas, como inclusões não metálicas e microtrincas.

Complementarmente, estudos como os de Vera *et al.* (2022) destacam que a qualidade da preparação metalográfica é determinante para a confiabilidade das análises microestruturais, especialmente em aços de baixo carbono. Paralelamente, Sarruf *et al.* (2015) evidencia a importância de técnicas quantitativas na caracterização microestrutural, permitindo correlacionar parâmetros de soldagem com a distribuição de fases e tamanho de grão.

No contexto do processo GTAW, essas abordagens tornam-se particularmente relevantes para a avaliação de microestruturas formadas sob diferentes condições térmicas, como aquelas impostas pela alimentação contínua e dinâmica do arame.

### 3.1.2 Macrografias

A análise macrográfica é utilizada para avaliar a estrutura do material em escala macroscópica, sendo realizada a olho nu ou com baixo aumento. O procedimento envolve a preparação de seções transversais da junta soldada, submetidas a ataque químico, permitindo a visualização do perfil do cordão, penetração, fusão e defeitos internos.

Além disso, normas como a AWS D1.1:2025 estabelecem critérios de aceitação para descontinuidades observadas em análises macrográficas, consolidando essa técnica como fundamental no controle de qualidade das soldas.

### 3.1.3 Processos de Soldagem C-GTAW e GTAW-DWF

O processo C-GTAW com alimentação contínua, caracteriza-se pela introdução constante do arame na poça de fusão, o que pode resultar em crescimento de grãos colunares. Em contrapartida, o processo GTAW-DWF, utiliza alimentação dinâmica do arame, geralmente pulsada ou sincronizada com o arco, promovendo melhor controle

da poça de fusão, redução do aporte térmico médio e maior refinamento microestrutural.

Conforme demonstrado por Neves (2022), a alimentação dinâmica do arame promove perturbações controladas na poça de fusão, alterando as condições de solidificação e favorecendo o refinamento microestrutural. Em contraste, o processo C-GTAW com alimentação contínua tende a apresentar maior estabilidade térmica global, porém com menor capacidade de controle sobre a nucleação e crescimento dos grãos.

### 3.2 NORMAS TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS APLICÁVEIS

As análises macrográficas e micrográficas em soldagem são orientadas por normas técnicas internacionalmente reconhecidas, garantindo a padronização dos resultados. A AWS D1.1 – *Structural Welding Code Steel* (2025) estabelece critérios para a avaliação de juntas soldadas por inspeção macrográfica. Embora não seja específica para metalografia, essa norma utiliza a macrografia como ferramenta complementar para verificar a qualidade do cordão de solda, a penetração, a fusão e possíveis descontinuidades. Já a metalografia é mais associada às normas ASTM, voltadas ao estudo da microestrutura dos metais.

Nesse contexto, a ASTM E3-11 – *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens* (2017), apresenta diretrizes para a preparação de amostras metalográficas destinadas a análises microscópicas, contemplando etapas como corte, montagem, lixamento, polimento e ataque químico. Isto garante que os resultados obtidos sejam comparáveis e reproduzíveis entre diferentes laboratórios.

Além disso, a ASTM E45 — *Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel* (2005) estabelece métodos para a determinação e classificação de inclusões não metálicas em aços por análise microscópica, incluindo procedimentos metalográficos aplicados à preparação e diferenciação das inclusões, como óxidos e sulfetos.

Complementarmente, a ABNT NBR 15454 — Metalografia das ligas ferro-carbono - Terminologia, padroniza os termos técnicos empregados na caracterização metalográfica de ligas ferro-carbono, servindo como referência para a identificação e análise microestrutural das amostras, incluindo fases, constituintes e inclusões não metálicas, como óxidos e sulfetos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ANÁLISES MACROESTRUTURAL

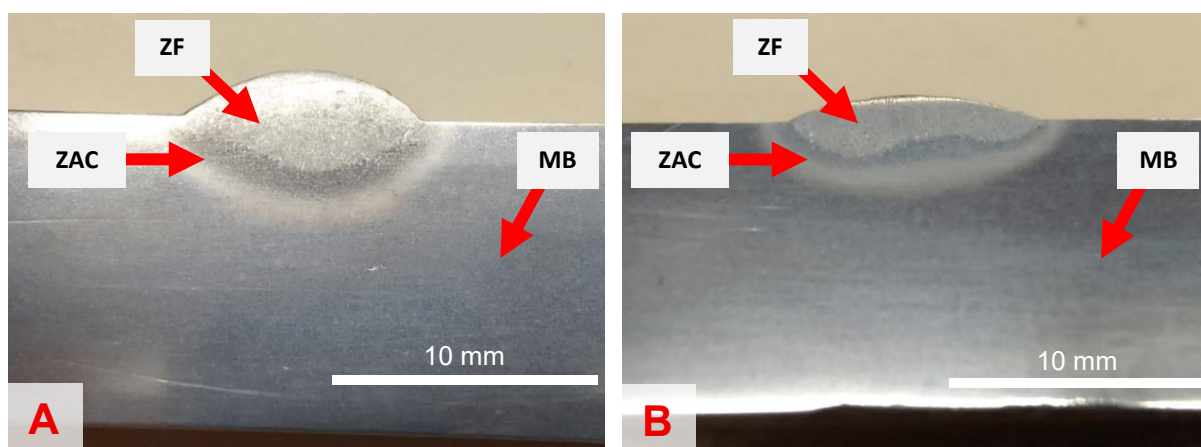
A análise macroestrutural foi realizada com o objetivo de verificar a integridade das juntas soldadas e identificar, de forma global, as regiões características do cordão de solda, incluindo o metal de base (MB), a zona afetada pelo calor (ZAC) e a zona fundida (ZF) para a realização da microscopia.

#### 4.1.1 Comparativo macroestrutural das amostras

De modo geral, observa-se que ambas as amostras apresentam cordões de solda isentos de descontinuidades macroscópicas relevantes, tais como trincas, porosidade visível ou falta de fusão, indicando que os parâmetros de soldagem adotados foram adequados para a obtenção de juntas com boa qualidade metalúrgica.

As macrografias também evidenciam diferenças na geometria do cordão de solda entre os processos analisados, onde no C-GTAW, verifica-se a largura da ZF de 9,7 mm, 2,08 mm de altura do cordão e 1,91 mm de penetração (Figura 8A), em contrapartida, no processo GTAW-DWF, observa-se assimetria na geometria do cordão de solda, apresentando 11 mm de largura de cordão, 1,5 mm de penetração máxima e 0,82 mm de altura do cordão (Figura 8-B).

**Figura 8 – Macrografias dos corpos de prova, evidenciando as áreas de interesse**



**Fonte:** Autores (2026).

**Nota:** (A) CP com C-GTAW; (B) CP com GTAW-DWF.

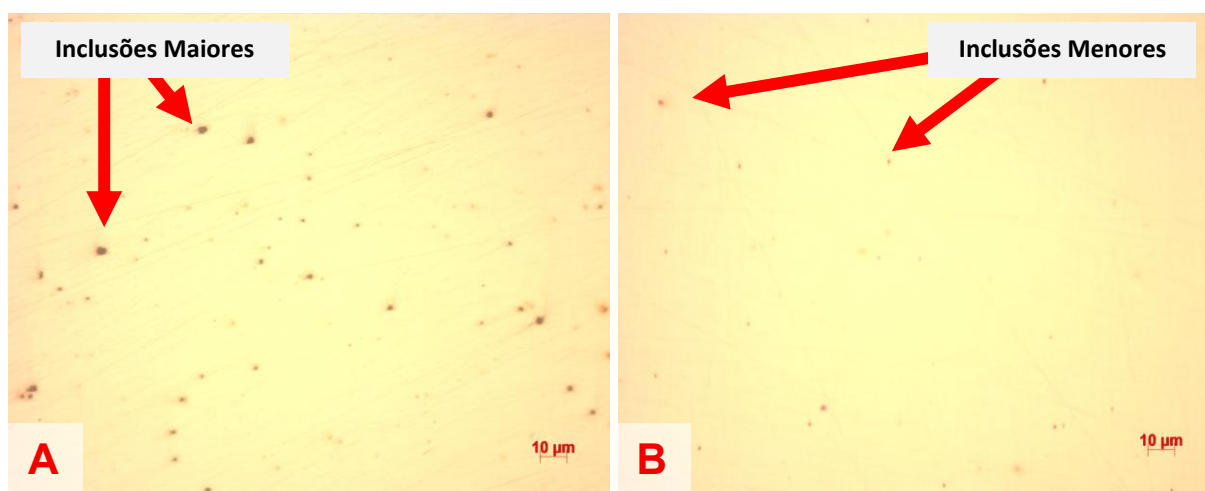
As amostras permitiram a clara identificação das regiões de interesse para as análises microestruturais subsequentes, evidenciando os limites entre o metal de base (MB), a ZAC e a zona fundida (ZF). A partir dessas regiões, foram selecionados pontos específicos para a obtenção das micrografias, conforme discutido adiante.

## 4.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

### 4.2.1 Comparativo de inclusões

As micrografias das amostras polidas evidenciam a presença de inclusões não metálicas dispersas na zona fundida, predominantemente associadas a óxidos e silicatos oriundos do material de adição e das condições do processo. Nota-se maior incidência dessas inclusões nas amostras produzidas por C-GTAW entre 2,036  $\mu\text{m}$  e 3,999  $\mu\text{m}$  (Figura 9A), possivelmente em função do menor controle da transferência metálica. Na amostra obtida por GTAW-DWF (Figura 9B), observa-se redução na quantidade e tamanho dessas inclusões na faixa entre 0,947  $\mu\text{m}$  a 1,009  $\mu\text{m}$ , indicando maior estabilidade do processo e menor aprisionamento de impurezas. Tais características são relevantes, uma vez que inclusões podem atuar como pontos de nucleação de falhas, influenciando negativamente o desempenho mecânico da junta soldada.

**Figura 9 – Análise microestrutural das inclusões no metal de base SAE 1020**



**Fonte:** Autores (2026).

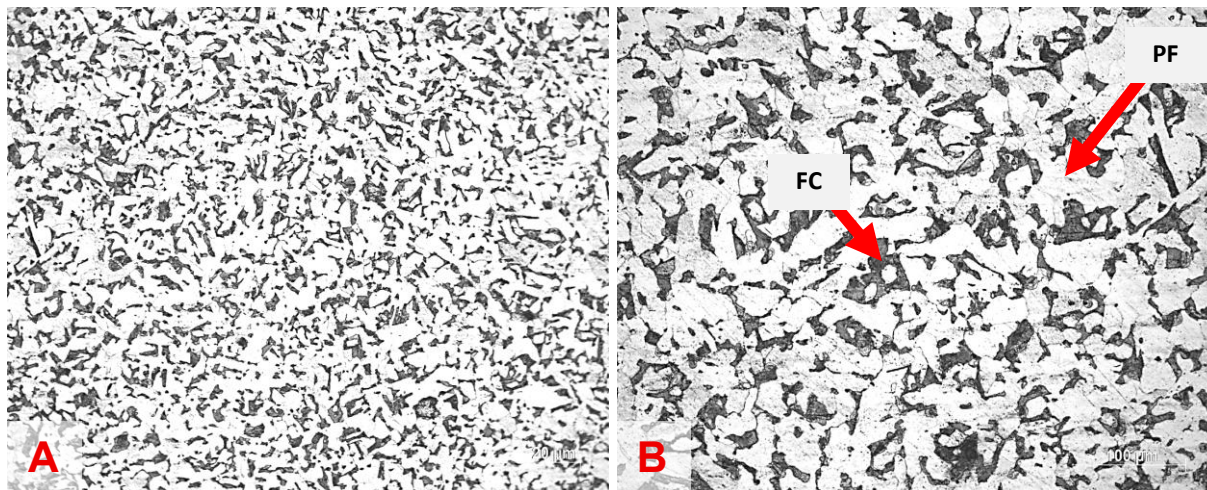
**Nota:** (A) no processo C-GTAW; (B) no processo GTAW-DWF.

Correlacionando a menor incidência das inclusões na zona fundida da solda realizada com o processo GTAW-DWF evidenciada na Figura 9B, se comparada a solda realizada pelo processo C-GTAW (Figura 9A); com os estudos de Neves (2022), onde ele afirma que a ausência de micro defeitos de solidificação foram associados à melhoria da vida em fadiga; pode-se refletir que a frequência dinâmica de alimentação do arame (10 Hz) na poça de fusão, foi benéfica do ponto de vista das propriedades mecânicas.

#### 4.2.2 Micrografias do Metal de Base (MB)

As micrografias do metal de base apresentadas na Figura 10, confirmam a microestrutura típica do aço SAE 1020, caracterizada por matriz ferrítica com colônias de perlita distribuídas de forma heterogênea. A ferrita (PF), de coloração mais clara, predomina na microestrutura, enquanto a perlita (FC), de aspecto lamelar e mais escuro, contribui para o aumento da resistência mecânica do material. Essa estrutura inicial serve como referência para avaliar as transformações metalúrgicas induzidas pelo processo de soldagem nas regiões adjacentes.

**Figura 10 – Micrografia do metal de base (MB) do SAE 1020**



**Fonte:** Autores (2026).

**Nota:** (A) MB ampliado em 100X; (B) MB com ampliação a 200X.

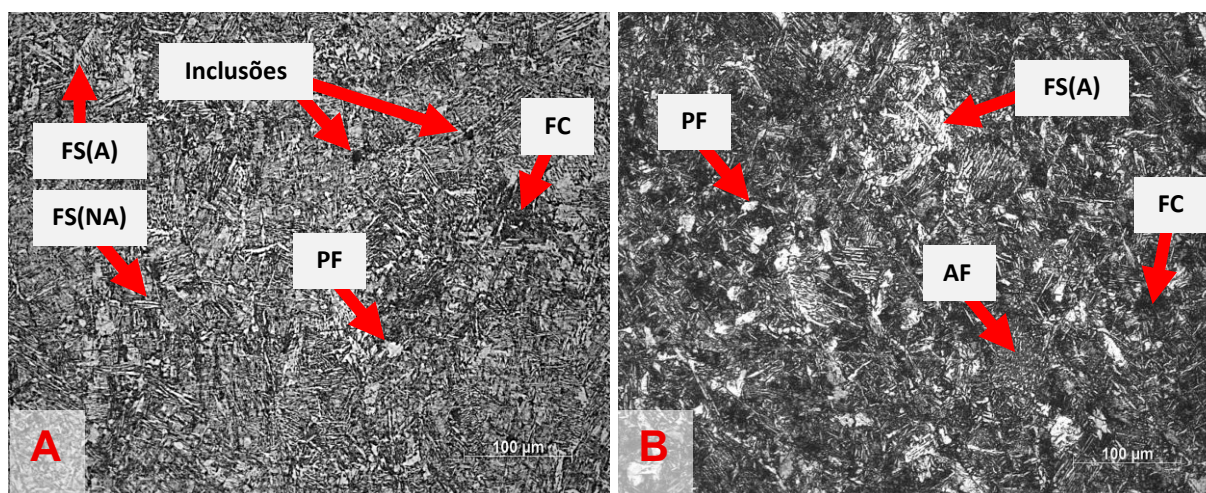
#### 4.2.3 Micrografias da Zona Fundida (ZF)

As micrografias da zona fundida revelam diferenças marcantes na morfologia dos grãos em função do modo de alimentação do arame. No processo C-GTAW,

conforme observado na Figura 11A, nota-se a predominância de grãos colunares com orientação preferencial, indicando crescimento direcional associado à direção do fluxo térmico, característica típica de condições de solidificação com elevado gradiente térmico e menor taxa de nucleação. A matriz apresenta-se constituída majoritariamente por ferritas primária (PF), aciculares (AF) e de segunda fase alinhada (FS-A) e não alinhadas (FS-NA), com presença de perlita (FC).

Por outro lado, a amostra produzida por GTAW-DWF (Figura 11B), apresenta microestrutura mais refinada, com maior presença de grãos equiaxiais e estruturas aciculares mais finas, resultado da perturbação dinâmica da poça de fusão, que favorece a nucleação heterogênea. A ferrita acicular (AF) observada na ZF do corpo de prova soldado por GTAW-DWF, apresenta-se mais refinada associada a perlita dispersa (FC), indicando maior taxa de nucleação durante a solidificação, além de evidenciar a presença de ferrita primária (PF). Foi evidenciada também, a presença da ferrita de segunda fase não alinhada (FS-NA). Essa modificação na morfologia dos grãos está diretamente associada à melhoria das propriedades mecânicas e à maior presença de perlita dispersa e ferrita acicular.

**Figura 11 – Micrografias da zona fundida (ZF) com ampliação de 200x**



**Fonte:** Autores (2026).

**Nota:** À esquerda (A) ZF com C-GTAW; À direita (B) com GTAW-DWF.

#### 4.2.4 Micrografias da Zona Afetada pelo Calor (ZAC)

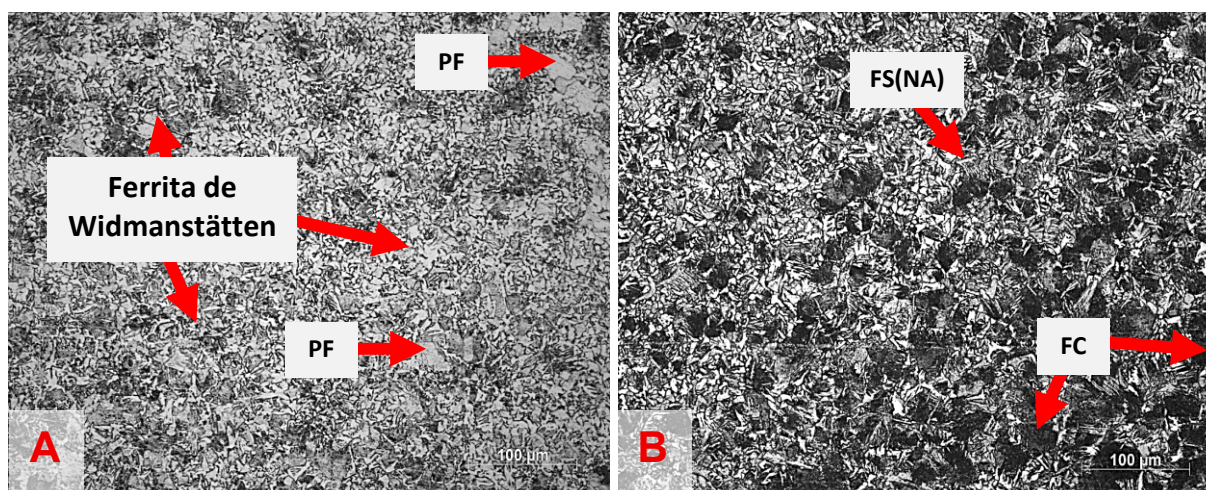
Na região da zona afetada pelo calor (Figura 12-A), observa-se que o processo C-GTAW promove uma ZAC com evidências de crescimento de grãos e transformação microestrutural mais pronunciada.

A presença de ferrita grosseira (PF) nas regiões mais próximas à zona fundida e regiões parcialmente transformadas, indicam exposição prolongada a temperaturas elevadas. Também se observa a presença significativa de ferrita de Widmanstätten em placas primárias e secundárias, possivelmente causado pelo maior aquecimento da alimentação contínua da poça de fusão (Figura 12A).

De acordo com Colpaert (2008), em condições de resfriamento lento, a estrutura apresenta morfologia equiaxial, enquanto, com o aumento da taxa de resfriamento, evolui progressivamente para formas aciculares (em formato de agulha).

Em contrapartida, no processo GTAW-DWF, a ZAC apresenta maior presença de esboroamento da perlita (FC) nas regiões próximas à linha de fusão em sinergia com a ferrita de segunda fase não alinhada (FS-NA), compreendendo um balanço entre as diferentes taxas de resfriamento entre as fases observadas na Figura 12B.

**Figura 12 – Micrografias da zona afetada pelo calor com ampliação de 200x**



**Fonte:** Autores (2026).

**Nota:** À esquerda (A) ZAC com C-GTAW; À direita (B) ZAC com GTAW-DWF.

Essa diferença é fundamental para preservar as propriedades mecânicas do material de base, reduzindo a degradação estrutural associada ao ciclo térmico da soldagem. O esboroamento da perlita da ZAC do GTAW-DWF observado na Figura 12B refletirá em maior ductilidade e menor dureza, além de reduzir as concentrações de tensões internas, tornando o material menos suscetível a trincas e fraturas frágeis. Entretanto, conforme discutido por Colpaert (2008), a perlita esboroada também poderá apresentar efeitos deletérios quando distribuída de forma grosseira ou heterogênea, especialmente em regiões submetidas a ciclos térmicos intensos, como a ZAC, sendo pertinente uma análise de tenacidade para corroborar as propriedades mecânicas com as micrografias obtidas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ambas as amostras soldadas com alimentação contínua (C-GTAW) e alimentação dinâmica (GTAW-DWF), apresentaram soldas satisfatórias, isentas de descontinuidades macroscópicas relevantes.

As análises de inclusões das zonas fundidas, revelaram que o processo GTAW com alimentação dinâmica de 10 Hz, possui maior estabilidade de arco na poça de fusão favorecendo a difusão dos gases e consequentemente, reduzir significativamente o aprisionamento de impurezas, corroborando com a maior resistência à fadiga, observada nos estudos de Neves (2022).

As micrografias das zonas fundidas diferenciam-se principalmente pela presença marcante da ferrita acicular e ferrita primária na solda realizada pelo processo GTAW-DWF, além da ferrita de segunda fase alinhada e perlita, refletindo um balanço de fases.

No que diz respeito às zonas afetadas pelo calor foram evidenciadas diferenças significativas, onde o corpo de prova dos processos GTAW com alimentação contínua, apresentou ferrita primária na região de granulometria grosseira e ferrita de Widmanstätten, enquanto, na solda realizada por GTAW-DW, observa-se o esboroamento da perlita em sinergia com a ferrita de segunda fase não alinhada, o que poderá refletir em melhorias nas propriedades mecânicas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL. **ASTM E3-11**: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL. **ASTM E45-05**: Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL. **ASTM handbook of comparative world steel standards**. 3. ed. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2004.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME Boiler and Pressure Vessel Code – Section II**: Materials, Part C: Specifications for Welding Rods, Electrodes, and Filler Metals (SFA-5.12). New York: ASME, 2025.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME Boiler and Pressure Vessel Code – Section II: Materials, Part C: Specifications for Welding Rods, Electrodes, and Filler Metals (SFA-5.18)**. New York: ASME, 2025.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.1/D1.1M:2020 – Structural Welding Code – Steel**. Miami, FL: AWS, 2020.

ARCELORMITTAL. **Guia do aço**. Essel Engenharia, 2024. Disponível em: <<https://essel.com.br/download/arcelormittal-guia-do-aco/>>. Acesso em: 5 maio 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15454: Metalografia das ligas de ferro-carbono — Terminologia**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: materiais de construção mecânica**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2017.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2008.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.

MODENESI, P. J. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: UFMG, 2001.

NEVES, N. **Estudo da influência da frequência de alimentação dinâmica do processo de soldagem TIG automático no comportamento de fadiga axial do aço C-Mn-Si**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2022.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS INTERNATIONAL. **SAE J403\_202402: Chemical Compositions of SAE Carbon Steels**. Warrendale, PA: SAE International, 2024. Stabilized February 2024. Revised June 2014. Issued June 1911. Disponível em: <[https://saemobilus.sae.org/standards/j403\\_202402-chemical-compositions-sae-carbon-steels](https://saemobilus.sae.org/standards/j403_202402-chemical-compositions-sae-carbon-steels)>. Acesso em: 05 maio 2026. DOI: 10.4271/J403\_202402.

SARRUF, B. et al. Avaliação do desempenho de classificadores em metalografia quantitativa. **Revista Matéria**, v. 20, n. 2, p. 384–391, 2015. ISSN 1517-7076.

VERA, N. O.; PIO, I. H. P.; BARBOSA, F. L.; BRANDIM, A. S.; LEITE, R. C. **Procedures for preparing metallic specimens for submission to optical microscopy**. *Conjecturas*, v. 22, n. 5, p. 1-15, 2022. DOI: <https://doi.org/10.53660/CONJ-934-K05>