



Associação Brasileira de Soldagem

XLVII CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem  
III CBMAdi – Congresso Brasileiro de Manufatura Aditiva  
Joinville/SC Agosto de 2025

## Influência do Gás de Proteção na Soldagem GMAW Robotizada: Comparativo entre Ar, CO<sub>2</sub> e Mistura Ar + CO<sub>2</sub>.

### (Influence of Shielding Gas on Robotic GMAW Welding: Comparison between Ar, CO<sub>2</sub> and Ar-CO<sub>2</sub> Mixture)

Gilson de March<sup>1</sup>, Anderson Daleffe<sup>1</sup>, Henrique Cechinel Casagrande<sup>1</sup>, Joelson Vieira de Silva<sup>1</sup>, Lirio Schaeffer<sup>2</sup>, Daniel Fritzen<sup>1</sup>, Pedro Henrique Menegaro Possamai<sup>1</sup>, Raiane Cruz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UNISATC, Mestrado profissional em Engenharia Metalúrgica, Criciúma, Santa Catarina, Brasil, e-mail: [gilson.march@satc.edu.br](mailto:gilson.march@satc.edu.br), Mestrado profissional em Engenharia Metalúrgica, Criciúma, Santa Catarina, Brasil, e-mail: [Anderson.daleffe@satc.edu.br](mailto:Anderson.daleffe@satc.edu.br), Mestrado profissional em Engenharia Metalúrgica, Criciúma, Santa Catarina, Brasil, e-mail: [henrique\\_cechinel@hotmail.com](mailto:henrique_cechinel@hotmail.com), Mestrado profissional em Engenharia Metalúrgica, Criciúma, Santa Catarina, Brasil, e-mail: [joelson.silva@satc.edu.br](mailto:joelson.silva@satc.edu.br), Mestrado profissional em Engenharia Metalúrgica, Criciúma, Santa Catarina, Brasil, e-mail: [daniel.fritzen@hotmail.com](mailto:daniel.fritzen@hotmail.com), Mestrado profissional em Engenharia Metalúrgica, Criciúma, Santa Catarina, Brasil, e-mail: [pedropossamai@hotmail.com](mailto:pedropossamai@hotmail.com), Mestrado profissional em Engenharia Metalúrgica, Criciúma, Santa Catarina, Brasil, e-mail: [raiane.cruz@satc.edu.br](mailto:raiane.cruz@satc.edu.br). <sup>2</sup>UFRGS-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Transformação Mecânica, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, e-mail: [schaefer@ufrgs.br](mailto:schaefer@ufrgs.br).

#### Resumo

Este estudo apresenta uma análise os efeitos da variação do tipo de gás de proteção no processo de soldagem GMAW (Gás Metal Arc Welding) realizado por meio de um sistema robotizado. Foram utilizados três tipos de gases: gás argônio (Ar) puro, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) puro e uma mistura de argônio com CO<sub>2</sub> (85% Ar / 15% CO<sub>2</sub>), amplamente empregada na indústria. As soldagens foram realizadas com parâmetros padronizados, utilizando robô industrial para garantir repetibilidade e precisão do processo. As amostras resultantes foram submetidas a análises visuais, macrográficos, micrográficos, análise termográfica e ensaios mecânicos de tração e dureza do material, de base, Zona Termicamente Afetada (ZTA) e material de deposição da solda, além de medições de penetração e largura do cordão de solda. Os resultados indicaram que a composição do gás de proteção influencia significativamente a estabilidade do arco elétrico, a geometria do cordão e as propriedades mecânicas da junta soldada. A mistura de Ar e CO<sub>2</sub> apresentou desempenho intermediário, combinando boa penetração com menor respingo em relação ao CO<sub>2</sub> puro. Já o Ar puro mostrou limitações em termos de fusão e penetração, enquanto o CO<sub>2</sub> puro proporcionou maior penetração, porém com maior geração de respingos e instabilidade do arco. O estudo reforça a importância da escolha adequada do gás de proteção em processos automatizados, visando otimizar qualidade, produtividade na soldagem MIG/MAG.

**Palavras-chave:** Soldagem Robotizada; Gás de proteção; Soldagem MIG/MAG; GMAW.

**Abstract:** This study presents an analysis of the effects of varying the type of shielding gas on the GMAW (Gas Metal Arc Welding) welding process performed by means of a robotic system. Three types of gases were used: pure argon gas (Ar), pure carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and a mixture of argon with CO<sub>2</sub> (85% Ar / 15% CO<sub>2</sub>), widely used in industry. The welds were performed with standardized parameters, using an industrial robot to ensure repeatability and precision of the process. The resulting samples were subjected to visual, macrographic, micrographic, thermographic analyses and mechanical tests of tensile and hardness of the material, base, Heat Affected Zone (HAZ) and weld deposition material, in addition to depth and width of the weld bead. The results indicated that the composition of the shielding gas significantly influences the stability of the electric arc, the geometry of the bead and the mechanical properties of the welded joint. The Ar and CO<sub>2</sub> mixture showed intermediate performance, combining good penetration with less spatter compared to pure CO<sub>2</sub>. Pure Ar showed limitations in terms of fusion and penetration, while pure CO<sub>2</sub> provided greater penetration, but with greater generation of spatter and arc instability. The study reinforces the importance of choosing the right shielding gas in automated processes, improving quality and productivity in MIG/MAG welding.

**Key-words:** *Robotic Welding; Shielding Gas; MIG/MAG Welding; GMAW Welding.*

## 1. Introdução

A soldagem constitui um dos principais métodos de união permanente de materiais metálicos na indústria, fundamentando-se na interação entre átomos por meio de forças Inter atômicas, como coesão e adesão. O processo envolve a aplicação controlada de calor, com ou sem o uso de material de adição, promovendo a fusão localizada das superfícies em contato e sua posterior solidificação. Essa transformação térmica resulta em modificações microestruturais e cristalinas nas regiões afetadas, garantindo a formação de juntas com elevada resistência mecânica e estabilidade estrutural [1].

A soldagem MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*) é amplamente utilizada na indústria metalmeccânica devido à sua alta taxa de deposição, boa qualidade do cordão e versatilidade na união de diversos metais. No entanto, o desempenho e a qualidade do processo são diretamente influenciados por diversos fatores, entre eles o tipo e a vazão do gás de proteção utilizado. Esse gás tem a função de proteger o arco elétrico e o banho de fusão contra a contaminação atmosférica, além de influenciar na estabilidade do arco, na transferência metálica, na formação de respingos e na penetração da solda [2], [6].

Os gases de proteção com percentuais baixos de dióxido de carbono geralmente resultarem em ligas metálicas com propriedades mecânicas superiores, estas soldagens podem ser mais afetadas por defeitos de falta de fusão do que aquelas executadas a partir de gases de proteção com maior potencial de oxidação. Gases de proteção com baixo potencial de oxidação produzem cordão de solda com perfil de penetração muito estreito. Adicionar dióxido de carbono ao gás de proteção tem um efeito significativo no perfil do cordão de solda, tornando-o mais largo e mais arredondado, reduzindo assim as chances de ocorrência de defeitos de falta de fusão. [3]

O dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) é um gás ativo geralmente empregado por seu baixo custo e por proporcionar um perfil equilibrado de largura e profundidade de penetração do cordão de solda na transferência de curto-circuito, embora esteja associado a um arco menos estável e maior formação de respingos, quando exposto às altas temperaturas da coluna do arco elétrico, o  $\text{CO}_2$  sofre dissociação térmica, resultando na formação de monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) e oxigênio molecular ( $\text{O}_2$ ). Essa dissociação, seguida da recombinação parcial dos gases, promove um ambiente com baixo potencial de ionização e condutividade térmica reduzida, o que gera uma zona de alta temperatura no centro da coluna do arco. Como consequência, há um aumento do potencial de oxidação do metal base, o que pode ocasionar a perda de elementos de liga na poça de fusão [4], [5], [6], [7].

O argônio (Ar) é um gás inerte amplamente utilizado como gás de proteção nos processos de soldagem por arco elétrico, especialmente em aplicações com metais não ferrosos e ligas especiais, favorece a estabilidade do arco e reduz a geração de respingos. Este gás apresenta baixa condutividade térmica e baixo potencial de ionização, características que limitam a dissipação de calor para as zonas externas da coluna do arco. Como resultado, forma-se uma coluna de arco estreita, com maior concentração de energia na região central. Essa configuração promove um perfil de penetração profundo e relativamente estreito [4] [5] [6] [7].

A Mistura entre argônio e  $\text{CO}_2$  busca reunir as vantagens de ambos os gases, sendo amplamente empregada em aplicações industriais automatizadas. Nas misturas de Argônio/ $\text{CO}_2$ , o teor de  $\text{CO}_2$  varia de 5% a 25%, a composição do gás de proteção exerce influência significativa sobre a transferência metálica, a penetração e a qualidade do cordão de solda. Misturas gasosas com baixo teor de  $\text{CO}_2$  são geralmente empregadas em processos com transferência por spray, sendo indicadas para a soldagem de materiais de maiores espessuras ou em aplicações que requerem baixa entrada de calor, como no caso de chapas finas. Por outro lado, misturas com alto teor de  $\text{CO}_2$  promovem a transferência por curto-circuito, proporcionando maior penetração e favorecendo a ação de limpeza da poça de fusão, o que contribui para a estabilidade e a uniformidade do cordão, especialmente em materiais de espessuras elevadas. No entanto, o aumento do  $\text{CO}_2$  na mistura também está associado a uma maior taxa de oxidação e à consequente perda de elementos de liga no metal depositado, podendo comprometer as propriedades mecânicas da solda [4] [5] [6] [7].

Com o progresso industrial e a escassez de mão de obra especializada, tornou-se indispensável a evolução dos processos de soldagem em direção à automação. A demanda por maior eficiência, repetibilidade e segurança operacional incentivou a substituição parcial das técnicas convencionais por

sistemas automatizados e robotizados. Atualmente, os processos de soldagem classificam-se em manuais, automáticos ou semiautomáticos, sendo selecionados conforme os requisitos técnicos e econômicos de cada aplicação. Nesse contexto, a variação do tipo de gás de proteção pode impactar de forma significativa a eficiência e a qualidade do processo automatizado. Assim, torna-se relevante estudar os efeitos desses gases em ambientes controlados e com parâmetros padronizados [7] [9].

A soldagem robotizada tem se destacado como uma alternativa estratégica para aumentar a produtividade, a qualidade e a segurança nos processos industriais. De acordo com Kah *et al.* [10], sua aplicação em ambientes de produção de alto volume resulta em maior repetibilidade do processo, melhor acabamento das juntas soldadas e redução dos custos operacionais. Além disso, a utilização de programação offline e sistemas automatizados permite que os robôs realizem soldagens com alta precisão, mesmo em condições industriais complexas, reduzindo a necessidade de intervenção humana.

Este trabalho apresenta uma investigação experimental sobre o comportamento do processo MIG/MAG robotizado mediante a variação do tipo de gás de proteção. Foram utilizados três tipos de gás: argônio puro, CO<sub>2</sub> puro e uma mistura Ar-CO<sub>2</sub> (85/15). A análise comparativa foi realizada por meio de inspeção visual, análise macro e metalográfica, além de ensaios mecânicos de tração e dureza aplicados ao material base, à Zona Termicamente Afetada (ZTA) e ao metal de solda depositado. Os resultados obtidos buscam contribuir para a otimização do processo de soldagem em ambientes industriais automatizados, promovendo a melhoria da qualidade do produto final com redução de custos e aumento da produtividade.

## 2. Matérias e Métodos

O trabalho a seguir detalhará as etapas do processo e a influência do tipo de gás de proteção na soldagem GMAW robotizado conforme o fluxograma da figura 1.

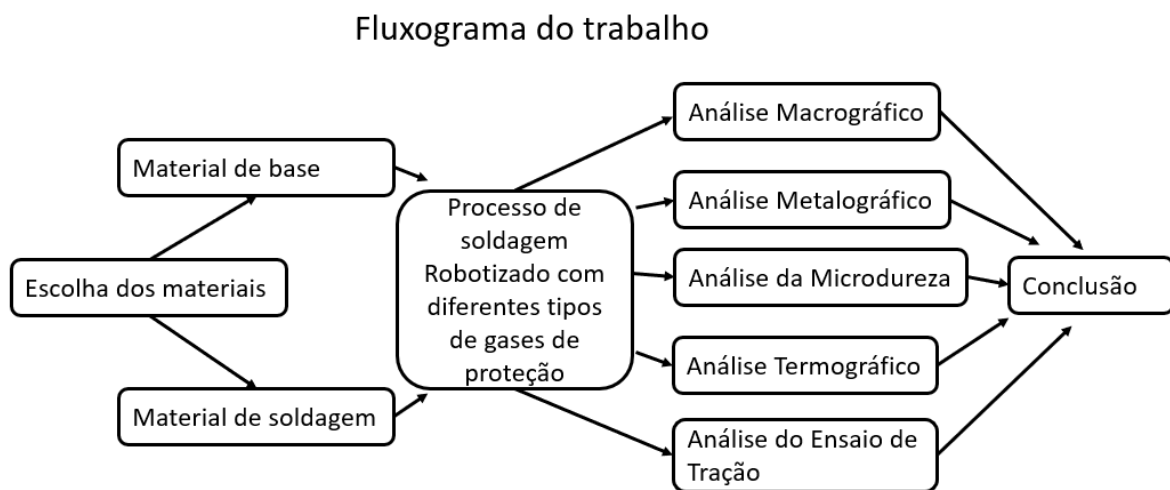


Figura 1. Fluxograma das etapas do trabalho

### 2.1. Material de Base e Material de Solda

O material de base utilizado para a união foi o aço carbono SAE 1020, amplamente empregado na indústria devido à sua boa soldabilidade, baixo custo e propriedades mecânicas adequadas para aplicações estruturais. Este aço possui teor médio de carbono, conforme dados representados na tabela 1, o que proporciona equilíbrio entre resistência mecânica, com resistência a tração varia entre 420 e 470 Mpa e um limite de escoamento entre 350 e 380 Mpa. Sua ductilidade é destacada pela capacidade de alongamento de até 25% [11].

Tabela 1: Composição química Aço SAE 1020 [11]

Componentes	% em peso
Carbono (C)	0,18 – 0,23
Manganês (Mn)	0,30 – 0,60
Fósforo (P)	0,03
Enxofre (S)	0,05
Silício (Si)	0,15 – 0,35
Ferro (Fe)	bal

Como material de adição, foi utilizado o arame sólido ER70S-6, a Tabela 2 representa sua composição química, suas propriedades mecânicas proporcionam resistência a tração mínima de 480 Mpa e limite de escoamento mínimo de 400 Mpa com capacidade de alongamento superior a 22% [12], apropriado para o processo de soldagem MIG/MAG, caracterizado por seu alto teor de desoxidantes (Mn e Si), que favorecem a estabilidade do arco e a formação de cordões com baixa incidência de defeitos, especialmente em chapas com presença de óxidos ou sujeira superficial. A combinação entre o aço SAE 1020 e o arame ER70S-6 é reconhecida por proporcionar boas propriedades mecânicas na junta soldada, além de excelente fusão e acabamento superficial.

Tabela 2. Composição química arame ER 70S 6 [13]

Componentes	% em peso
Carbono (C)	0,06 – 0,15
Manganês (Mn)	0,40 – 1,85
Silício (Si)	0,20 – 1,15
Fósforo (P)	0,025
Enxofre (S)	0,035
Níquel (Ni)	0,15
Cromo (Cr)	0,15
Molibdênio (Mo)	0,15
Vanádio (V)	0,03
Cobre (Cu)	0,50

## 2.2. Espectrometria de Emissão Óptica.

No ensaio de espectrometria de emissão óptica, foi utilizado o equipamento modelo Q2 ION da fabricante BRUKER, operando com uma potência de 400 Watts durante 30 segundos.

## 2.3. Preparação dos Corpos de Prova para Soldagem

Para a realização dos ensaios, foram preparados três corpos de prova conforme os requisitos estabelecidos pela norma AWS D1.1/D1.1M:2020, seção 5 (Qualification), referentes à qualificação de procedimentos de soldagem por união [13]. As amostras consistiram em chapas metálicas com espessura de ¼ de polegada (6,35 mm), cortadas nas dimensões de 150 mm × 75 mm, preparadas com chanfro em bisel de 30°, com raiz de 2 mm e ângulo de abertura de 60°, conforme indicado para juntas do tipo V. O espaçamento de raiz foi mantido em 2 mm para garantir adequada fusão da raiz durante a soldagem conforme a figura 2 representada abaixo.



Figura 2. Preparação do corpo de prova: 1:chanfro de 30°; 2: união corpos de prova para soldagem.

## 2.4. Processo de Soldagem

O processo de soldagem foi conduzido por meio de um sistema robotizado, utilizando um robô industrial Yaskawa modelo AR1440, de seis eixos, conforme Figura 3, o qual possibilita alta precisão e repetibilidade nos movimentos durante a união das chapas [15].



Figura 3. Robô de solda Yaskawa.

O equipamento de soldagem empregado foi o Power Wave E500 da Lincoln Electric, adequado para processos MIG/MAG e capaz de fornecer controle dos parâmetros operacionais, como corrente, tensão, velocidade de arame e características do arco conforme Tabela 3 representada abaixo. A programação do robô foi realizada com base em trajetória predefinida com a técnica puxando, com finalidade técnica de melhor penetração ao executar o passe de raiz, e com *stick-out* de aproximadamente 10 mm (definido através de experimento), garantindo consistência geométrica entre os corpos de prova. Essa configuração permitiu a realização de soldagens automatizadas de controle e qualidade, minimizando a influência de variáveis humanas e favorecendo a comparação dos efeitos dos diferentes gases de proteção utilizados no estudo.

Tabela 3: Parâmetros de soldagem

Parâmetros:	Valores:	Observações
Corrente Média(A)	124,5	Corrente de arco estabilizada
Tensão de Referência(V)	21,0	Valor programado no sistema
Tensão Média(V)	29,3	Tensão real medida durante a soldagem
Vazão do gás (L/min.)	12,0	Vazão de gás na poça de fusão
Velocidade do arame (m/min.)	4,70	Alimentação do arame na poça de fusão
Velocidade de soldagem (mm/s)	3,7	Avanço da tocha robotizada
Ângulo de avanço (°)	22,0	Ângulo da tocha em relação ao avanço

## 2.5. Micro dureza

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado utilizando um microdurômetro modelo HMV-2TADW, da marca Shimadzu®, em conformidade com a norma ABNT NBR ISO 6507. Para a aplicação da carga, foi utilizada uma força de 9,807 N por 10s. Foram efetuadas 10 indentações ao longo da seção transversal da amostra, com espaçamento regular de 1 milímetro entre cada ponto de medição.

## 2.6 Termografia

A análise termográfica da temperatura durante o processo de soldagem foi realizada utilizando uma câmera termográfica de alta resolução Optris PI 08M, posicionada em um tripé a uma distância que permitiu o enquadramento completo da área de soldagem. O equipamento capturou imagens em tempo real, registrando a distribuição térmica no eixo x (ao longo do cordão de solda) e eixo y (perpendicular ao cordão). Essa configuração possibilitou a observação detalhada do perfil de aquecimento lateral no material de base, fornecendo dados importantes sobre o comportamento térmico durante o processo, conforme ilustrado na Figura 4.

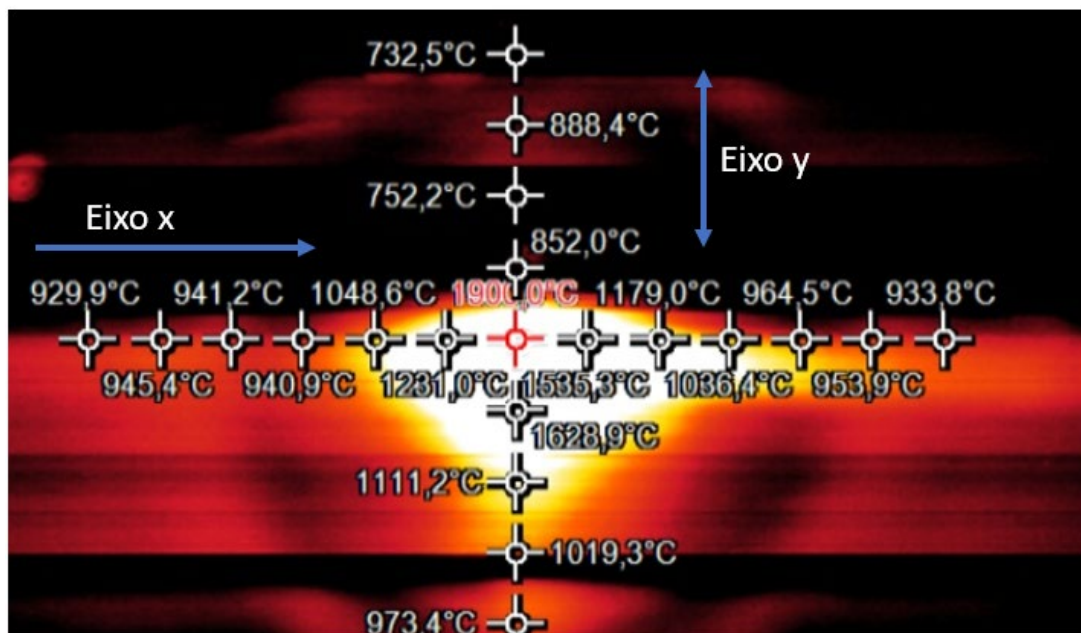


Figura 4. Imagem termográfica no processo de soldagem

## 2.7. Ensaio de tração

Para a determinação dos valores de tensão e deformação de cada corpo de prova por meio do ensaio de tração, foi necessária a preparação das amostras por usinagem e retificação, assegurando a padronização dimensional e a qualidade superficial. Os corpos de prova foram cortados a laser para cada

condição de gás de proteção, visando obter maior precisão geométrica, menor zona afetada termicamente e melhor acabamento superficial, seguindo a norma técnica E8/E8M – 15ª [16].

### 3. Resultados e Discussão

Os resultados obtidos neste estudo buscam compreender as decorrências no processo de soldagem de diferentes gases de proteção. A seguir, será apresentado e discutido os resultados obtidos neste estudo.

#### 3.1. Análise de espectrometria de emissão Óptica

Os resultados obtidos por meio da análise de espectrometria do material de base encontram-se detalhados na Tabela 4, apresentando a composição química dos elementos presentes na liga metálica utilizada no processo de soldagem.

Tabela 4: Composição química material de base

Componentes	% em peso
Carbono (C)	0,21
Manganês (Mn)	0,61
Fósforo (P)	0,023
Enxofre (S)	0,013
Silício (Si)	0,21
Ferro (Fe)	bal

Observa-se que a composição química do material está dentro dos limites especificados para o aço SAE 1020, conforme fabricante [11]. Trata-se de um aço amplamente utilizado na indústria devido à sua boa soldabilidade, ductilidade e custo acessível, especialmente em processos de fabricação, conformação e soldagem.

#### 3.2. Análise Macrográfica

Os resultados da análise macrográficas apresentam diferentes comportamento quanto ao tipo de gás utilizado, conforme representa a Figura 5. Cada amostra apresenta características distintas nas regiões das soldas com padrões de solidificação e irregularidades superficiais, indicando o processo de fusão e resfriamento, enquanto o material de base apresenta uma estrutura homogênea e uniforme, típica do material antes da soldagem, sem alterações significativas devido ao calor.

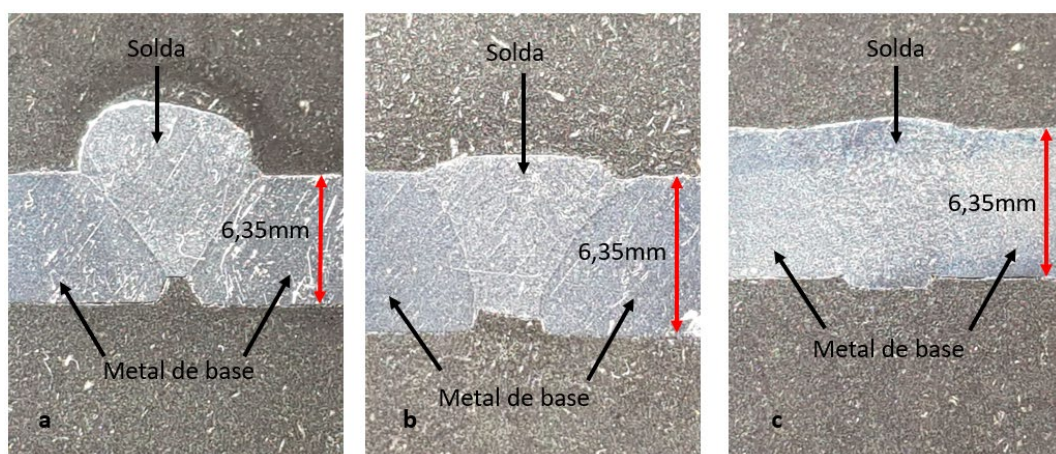


Figura 5. Análise macrográficas de diferentes gases de proteção: a) mistura Ar85% + CO<sub>2</sub> 15%; b) Ar (Argônio) puro; c) CO<sub>2</sub> (Dióxido de carbono) puro.

As amostras a e b apresentaram pouca penetração do cordão de solda no material de base, esse comportamento é esperado com o uso de gás inerte, que fornece excelente estabilidade do arco, porém com menor capacidade de transferência de calor, o que compromete a eficiência da fusão em profundidade.

A amostra c revela alta penetração e maior largura da zona fundida, com boa ancoragem no metal de base, esse tipo de gás está associado a maior formação de respingos e instabilidade do arco, exigindo controle rigoroso do processo.

### 3.2. Análise Metalográfica

A análise metalográfica exige a preparação cuidadosa da amostra, que deve ser submetida a etapas sequenciais de corte, lixamento, polimento e ataque químico. Esses procedimentos foram realizados com rigor para expor a microestrutura do material, permitindo a observação de suas características internas desde o material de base até a zona fundida por meio de microscopia óptica [17].

#### 3.2.1. Gás de proteção Ar 85% +CO<sub>2</sub> 15%

Na Figura 6 mostra a junta soldada com gás de proteção de mistura Ar85% + CO<sub>2</sub> 15%. A imagem ampliada 100x evidencia a mudança microestrutural provocada pelo ciclo térmico da soldagem, destacando a borda entre o metal de base à esquerda com maior concentração de ferrita e a região da solda à direita, com maior concentração de perlita resultante da elevação localizada da temperatura, a microestrutura da zona da solda apresentar ainda ferrita em grãos alongados ou equiaxiais maiores, dependendo da proximidade da linha de fusão e da taxa de resfriamento.

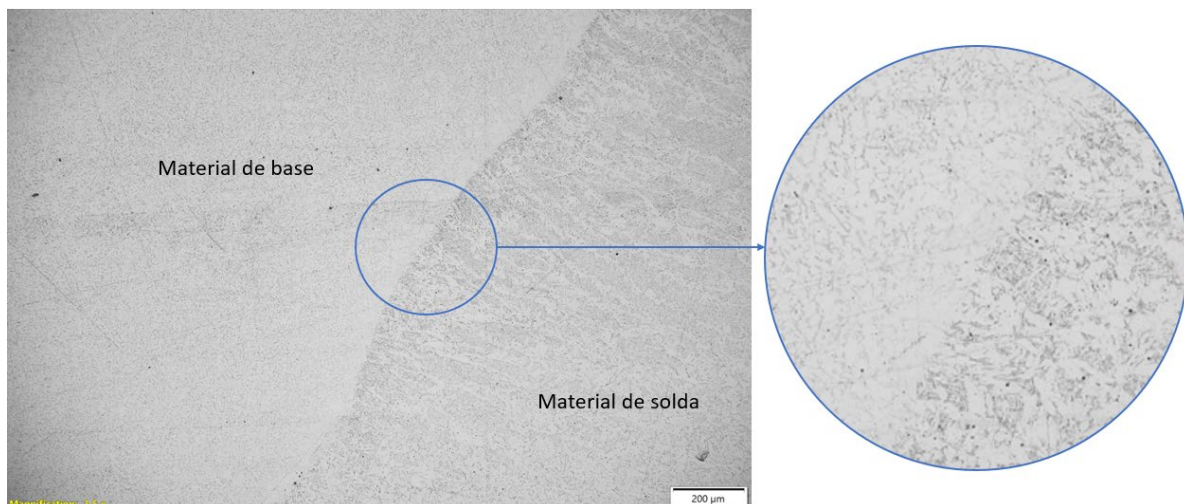


Figura 6. Imagem metalográfica com gás de mistura Ar 85%+CO<sub>2</sub> 15%.

A região ampliada 200x à direita mostra, com maior definição, as características metalúrgicas locais, como refinamento ou coalescência de grãos e heterogeneidades típicas da zona de transição.

#### 3.2.2. Gás de proteção Ar

Na análise metalográfica da junta soldada com Argônio puro é evidenciado a região de transição entre o metal de base com metal de solda conforme Figura 7.

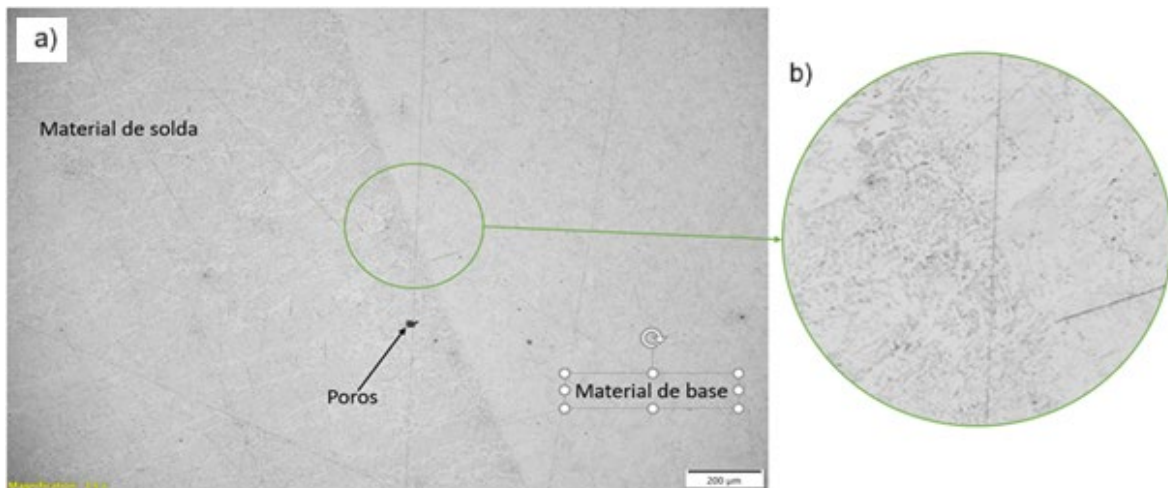


Figura 7. Imagem metalográfica com gás Ar puro

O detalhe a, ampliado 100x, permite observar com clareza a evolução microestrutural causada pelo processo de soldagem. No detalhe b, com aumento de 200x à direita da imagem, observa-se uma microestrutura composta por ferrita poligonal com perlita finamente distribuída nos contornos de grão, característica típica do aço SAE 1020 na condição de laminação ou recozido. Essa microestrutura é resultado de uma solidificação lenta e homogênea, com grãos uniformes e fase perlítica dispersa, conferindo boa ductilidade e tenacidade ao material. No metal de solda, à esquerda, a microestrutura apresenta ferrita acicular e perlita, com grãos de morfologia irregular, resultado da solidificação mais rápida e heterogênea da poça de fusão. A presença de ferrita em diferentes formas (acicular e/ou alinhada) e a distribuição da perlita são típicas de processos com alta taxa de resfriamento.

### 3.2.2. Gás de proteção CO<sub>2</sub>

A amostra soldada com CO<sub>2</sub> puro, representada na figura 8, detalha a composição química do material de base, zona de transição e material soldado.

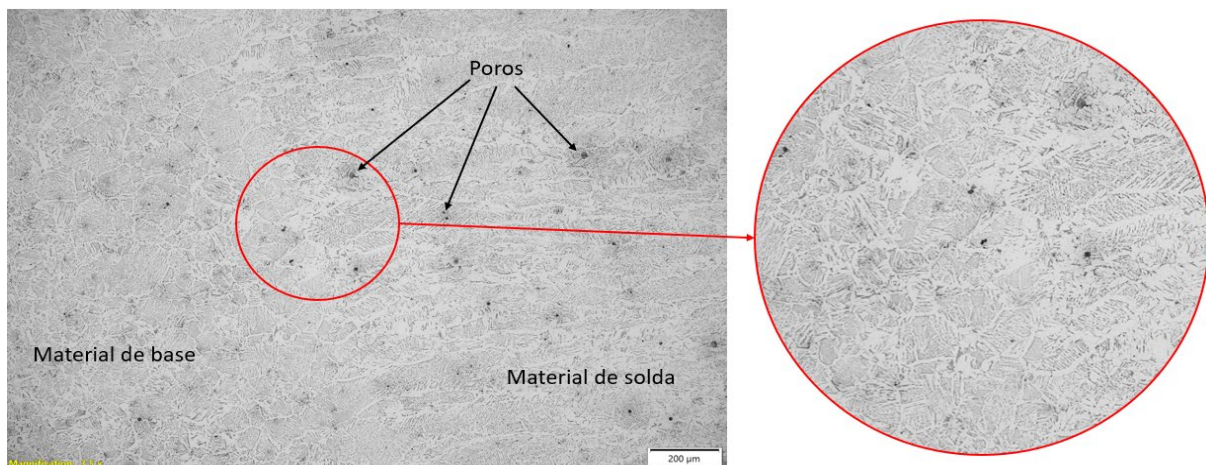


Figura 8. Imagem metalográfica com gás CO<sub>2</sub> puro

A micrografia óptica obtida com ampliação de 100x apresenta a região de transição entre o material de base e o material de solda de uma junta. No lado esquerdo da imagem observa-se o material de base, composto por uma microestrutura típica de aço de baixo carbono, predominantemente ferrita poligonal com perlita fina distribuída nos contornos de grão. À direita, na região correspondente ao metal de solda, a microestrutura apresenta feixes de grãos alongados com morfologia característica da ferrita de Widmanstätten, formados pela transformação da austenita durante o resfriamento intermediário. Essa estrutura, comum em soldagens de aços de baixo carbono, indica uma taxa de resfriamento moderada. A imagem destaca ainda a presença de poros dispersos na zona de transição, evidenciados por cavidades

escuras arredondadas, possivelmente originadas por aprisionamento de gases durante a solidificação da poça de fusão. O alongamento dos grãos no metal de solda é indicativo do fluxo térmico direcionado e da taxa de resfriamento elevada, fatores que influenciam diretamente na morfologia da estrutura solidificada e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas da junta.

### 3.3. Análise do Ensaio de Microdureza

No resultado do ensaio de microdureza Vickers a Figura 9 apresenta o perfil ao longo dos 3 corpos de prova soldado com diferentes gases de proteção, permitindo a avaliação da variação da dureza entre o material de base, a zona termicamente afetada (ZTA) e o metal de solda.

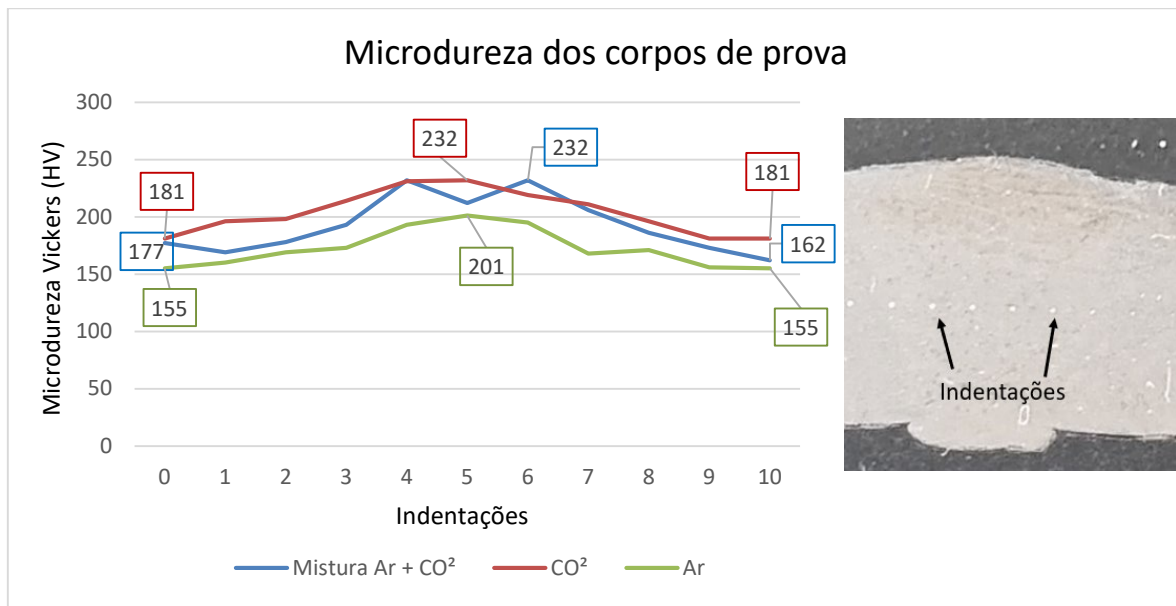


Figura 9. Gráfico do perfil da Microdureza do material de base e material soldado dos diferentes tipos de gases de proteção.

Os resultados da microdureza revelaram variações significativas nos valores de dureza ao longo da seção transversal dos corpos de prova soldados com diferentes gases de proteção. Em virtude do resfriamento rápido proporcionado pelo próprio metal de base e geometria da peça, além da migração de elementos de liga para essa região [18], [19].

As amostras soldadas com mistura de Ar + CO<sub>2</sub> (85/15) e com CO<sub>2</sub> puro apresentaram os maiores valores de dureza na região central da solda, atingindo picos de 232 HV, indicando maior endurecimento na ZTA e no metal de solda. Em contrapartida, o corpo de prova soldado com Ar puro apresentou valores inferiores em toda a extensão analisada, com pico de apenas 201 HV, o que sugere uma menor influência térmica e menor refinamento da microestrutura.

### 3.4. Análise Termográfica

A Figura 10 apresenta o perfil térmico no eixo y, obtido durante o processo de soldagem, medido em 10 pontos com distância de 10 mm ao longo da peça soldada e material de base das extremidades da solda, para três diferentes condições de gás de proteção: argônio puro (Ar) em verde, dióxido de carbono puro (CO<sub>2</sub>) em vermelho e mistura Ar + CO<sub>2</sub> em azul. O gráfico demonstra a variação da temperatura (em °C) ao longo dos pontos de medição, permitindo avaliar a influência térmica de cada gás sobre a região soldada [17].

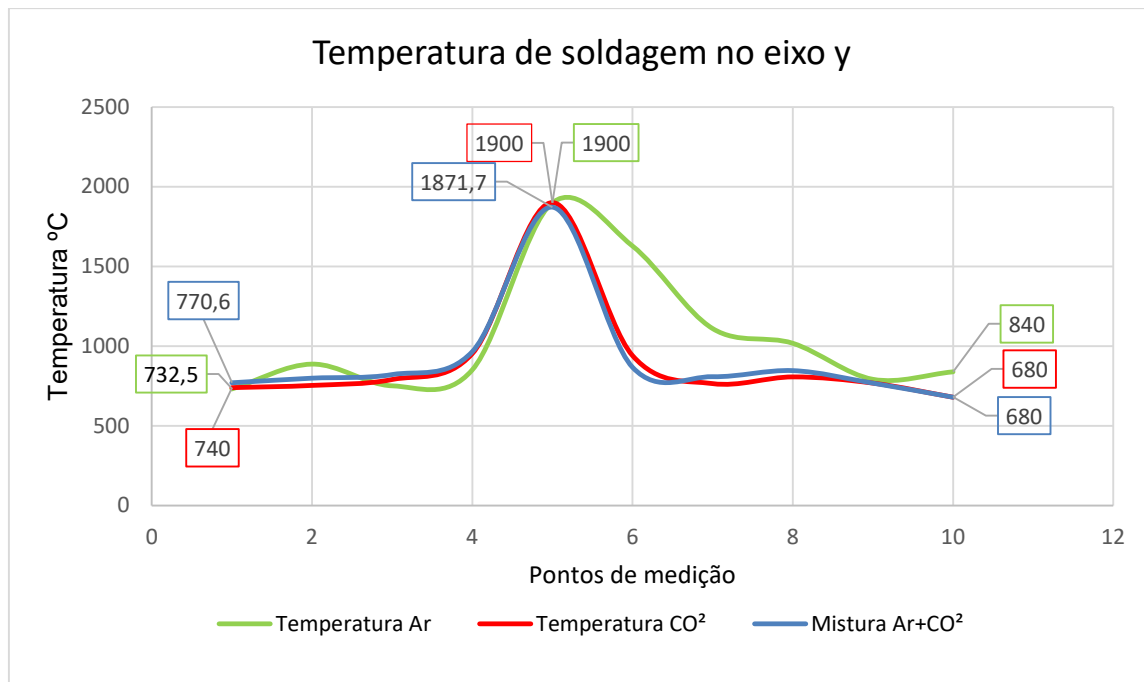


Figura 10. Gráfico temperatura transversal no processo de soldagem conforme os gases de proteção.

Observa-se que todas as curvas apresentam o mesmo padrão térmico, com um pico de temperatura na região central da junta, correspondendo à poça de fusão. Nessa região, os gases Ar puro e CO<sub>2</sub> puro atingiram um pico de 1900 °C, que possivelmente superou devido ao limite da câmara, enquanto a mistura Ar + CO<sub>2</sub> registrou uma temperatura máxima de 1871,7 °C. Nas regiões mais afastadas do centro, associadas ao material de base, as temperaturas foram substancialmente menores. O Ar puro apresentou valores de 732,5 °C e 840 °C, enquanto a mistura atingiu 770,6 °C e 680 °C, respectivamente. O CO<sub>2</sub> puro manteve temperaturas ligeiramente superiores à mistura de 740 °C e igual no ponto final de 680 °C.

A análise do perfil térmico no eixo y indica que o gás Ar puro apresentou maior dissipação térmica lateral, evidenciada pela elevação da temperatura nas extremidades da junta. Isso pode ser explicado pela maior condutividade térmica do arco gerado com Ar, que favorece uma distribuição de calor mais ampla, embora menos concentrada. Em contrapartida, o gás CO<sub>2</sub> e mistura Ar + CO<sub>2</sub> demonstrou um pico térmico concentrado, o que pode favorecer um controle mais preciso da penetração e menor zona termicamente afetada, embora o CO<sub>2</sub> puro, tenha gerado um pico térmico mais elevado, apresentou uma distribuição de calor semelhante a mistura de Ar + CO<sub>2</sub>.

Na figura 11 apresenta o perfil térmico no eixo x, correspondente à direção do avanço da tocha obtido durante o processo de soldagem, medido em 16 pontos com distância de 10mm ao longo da peça soldada com diferentes composições de gás de proteção.

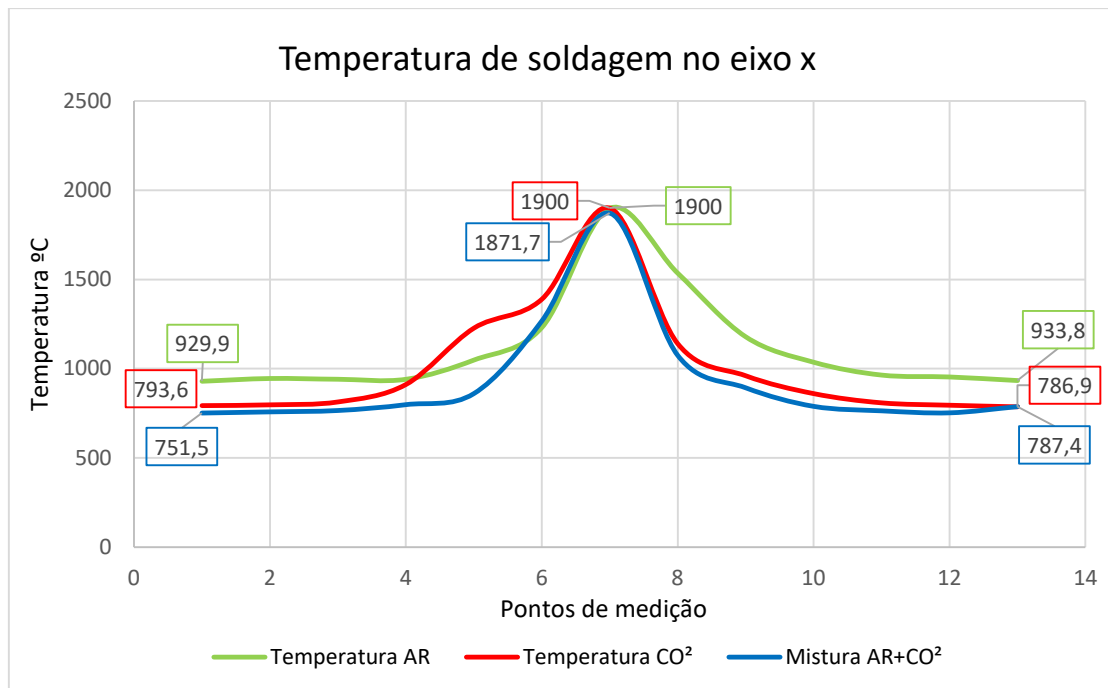


Figura 11. Gráfico temperatura longitudinal no processo de soldagem conforme os gases de proteção.

Os resultados mostram que o pico de temperatura ocorre ao centro da poça de fusão com as mesmas temperaturas de medição de temperatura no eixo x. Antes e após esse pico, observa-se uma queda gradual da temperatura, refletindo o gradiente térmico característico da soldagem.

Nos extremos do perfil, os valores são consideravelmente menores, indicando a dissipação térmica ao longo da soldagem. O Ar puro apresentou as maiores temperaturas nas extremidades, seguido do CO<sub>2</sub> com temperatura entre Ar e mistura de Ar+CO<sub>2</sub>. Esse comportamento sugere que o arco gerado com Ar puro promove uma distribuição térmica mais ampla e homogênea ao longo do cordão de solda, enquanto o arco com CO<sub>2</sub> ou com mistura tende a concentrar mais calor no centro da poça, com dissipação de calor mais rápido.

A análise do perfil do eixo x confirma que o tipo de gás de proteção influencia não apenas o pico térmico, mas também a distribuição do calor ao longo do cordão de solda, o que impacta diretamente no formato do cordão, na extensão da zona termicamente afetada (ZTA) e nas propriedades microestruturais e mecânicas da solda final.

### 3.5. Análise do Ensaio de tração

Os resultados obtidos em nossos ensaios de tração seguiram processo de corte laser, conforme norma E8/E8M – 15ª representados na Figura 12 abaixo.

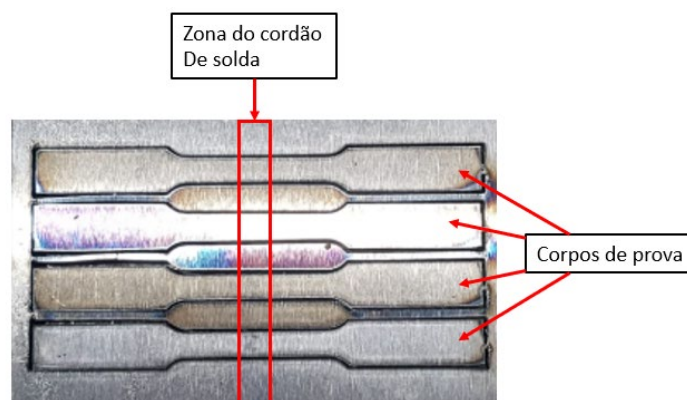


Figura 12: Corpos de prova para ensaio de tração.

As curvas apresentadas na Figura 13, obtidas a partir dos ensaios de tração, representam o comportamento médio dos corpos de prova soldados sob cada condição de gás de proteção, permitindo a análise comparativa da resistência mecânica e da ductilidade das respectivas juntas soldadas.

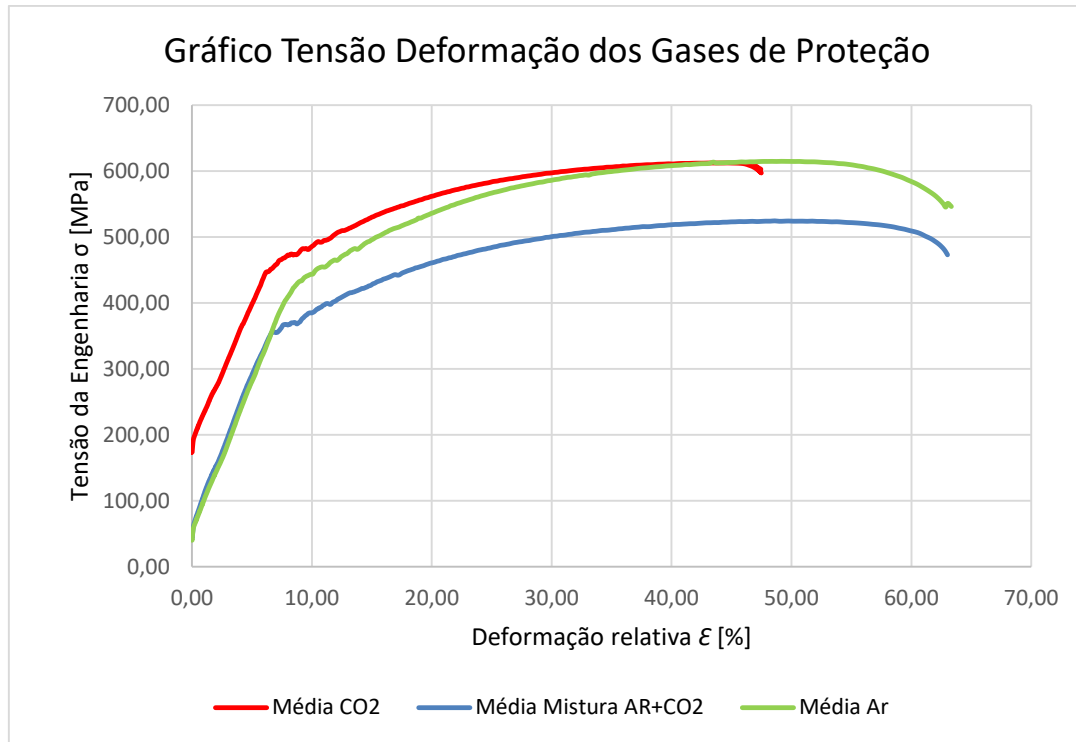


Figura 13: Gráfico tensão x deformação de diferentes gases de proteção

Os resultados obtidos evidenciam que a soldagem realizada com gás de proteção CO<sub>2</sub> apresentou a maior resistência à tração, atingindo valores próximos de 630 MPa, associada a uma deformação relativa de aproximadamente 45%. A soldagem com argônio puro demonstrou elevada ductilidade, com deformações superiores a 60%, mantendo uma resistência significativa, em torno de 600 MPa. Por outro lado, a condição com mistura Ar+CO<sub>2</sub> resultou em menor resistência mecânica, com tensão máxima inferior a 500 MPa e deformação de ruptura semelhante à obtida com argônio puro. Esses resultados estão de acordo com os dados experimentais encontrados na literatura (NEVES, 2018).

Esses resultados indicam que, embora o CO<sub>2</sub> proporcione maior resistência mecânica, o argônio confere melhor ductilidade e homogeneidade ao cordão soldado. A mistura Ar+CO<sub>2</sub>, resultou em propriedades mecânicas inferiores, possivelmente em razão do balanceamento entre oxidação e penetração térmica.

#### 4. Conclusões

Este estudo permitiu avaliar, de forma comparativa, a influência de diferentes gases de proteção, argônio puro, dióxido de carbono puro e mistura Ar + CO<sub>2</sub>, no desempenho metalúrgico e mecânico da soldagem MIG/MAG robotizada de aço carbono SAE 1020. Os resultados obtidos demonstraram que a composição do gás exerce papel determinante na estabilidade do arco elétrico, na geometria do cordão de solda, na distribuição térmica, nas transformações microestruturais e nas propriedades mecânicas finais da junta.

A soldagem com argônio puro apresentou elevada ductibilidade e boa homogeneidade microestrutural, embora com menor penetração, comportamento típico de gases inertes com baixa condutividade térmica. Por outro lado, o uso de CO<sub>2</sub> puro proporcionou maior penetração e dureza no material depositado, mas apresentou instabilidade do arco e maior tendência à formação de porosidades e respingos. A mistura Ar + CO<sub>2</sub> apresentou desempenho intermediário e mais equilibrado, com penetração satisfatória, microestrutura refinada e comportamento térmico mais concentrado, sendo uma alternativa viável para aplicações automatizadas que exigem controle dimensional e produtividade.

As análises termográficas reforçaram a relação entre o gás e o perfil térmico no eixo x e y do cordão de solda, evidenciando o impacto direto na extensão da ZTA e nas taxas de resfriamento, que contribuíram na formação de fases como ferrita de Widmanstätten

Já as análises metalográficas e de microdureza confirmaram as variações estruturais e de endurecimento associadas a cada condição de soldagem. Por fim, os ensaios de tração corroboraram os efeitos mecânicos observados, associando resistência e ductilidade à escolha do gás.

Dessa forma, conclui-se que a seleção adequada do gás de proteção, aliada ao controle preciso dos parâmetros operacionais em sistemas automatizados, é fundamental para otimizar a qualidade, a produtividade e o desempenho mecânico das juntas soldadas no processo MIG/MAG.

## 5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro Universitário UNISATC pelo suporte com a infraestrutura dos laboratórios e pesquisas elaboradas para conclusão do trabalho.

## 6. Referências Bibliográficas

- [1] JEFFUS, L. Welding: principles and applications. Cengage Learning, 2020.
- [2] LIPPOLD, J. C.; KOU, S. Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.
- [3] LINDE. Gases de proteção: Produtos e Processos Disponível em: [https://www2.ufjf.br/profab/wp-content/uploads/sites/312/2016/09/Gases-de-Protecao\\_catalogo-gases-e-processos.pdf](https://www2.ufjf.br/profab/wp-content/uploads/sites/312/2016/09/Gases-de-Protecao_catalogo-gases-e-processos.pdf) . Acesso em: 23junho 2025.
- [4] TATAGIBA, L. C. S.; GONÇALVES, R. B.; PARANHOS, R. Tendências no Desenvolvimento de Gases de Proteção Utilizados na Soldagem MIG/MAG. Soldag. Insp. São Paulo, Vol.17, Nº. 3, p.218-228, Jul/Set 2012.
- [5] MARQUES P. V.; MODENESI P. J.; BRACARENSE A. Q. Soldagem: fundamentos e tecnologia. 11. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG; 2009
- [6] KAH P. e MARTIKAINEN J. Influence of shielding gases in the welding of metals. Int J Adv Manuf Technol, 2013. 64:1411–1421 DOI 10.1007/s00170-012-4111-6.
- [7] GIMENES, L. JR.; CHIEPPE D.N. Gases de Proteção para Soldagem a Arco Elétrico. Fatec- SP Junho/2016 Disponível em: [https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/processos\\_solda/gases-de-protecao-para-soldagem-a-arco-eletrico.pdf](https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/processos_solda/gases-de-protecao-para-soldagem-a-arco-eletrico.pdf) Acesso em: 23 de junho de 2025.
- [8] AWS – AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS A5.32/A5.32M: *Specification for Welding Shielding Gases*. Miami: AWS, 2020.
- [9] WANG, L. L.; LU, F.; WANG H. P.; MURPHY A. B. Effects of shielding gas composition on arc profile and molten pool dynamics in gas metal arc welding of steels. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 91(9-12). 2017. DOI:10.1007/s00170-017-9990-0.
- [10] KAH, P.; SHRESTHA, M.; HILTUNEN, E.; MARTIKAINEN, J. Robotic arc welding sensors and programming in industrial applications. International Journal of Mechanical and Materials Engineering, [S.l.], v.10, n.13, p.1–16, 2015. DOI: 10.1186/s40712-015-0042-y. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/282540974>. Acesso em: 1 jun. 2025.
- [11] AÇO CARBONO. Catálogo-aco-carbono. Disponível em: <https://www.coppermetal.com.br/catalogos/catalogo-aco-carbono.pdf>.
- [12] KUNTZ, M. R. K. Análise Comparativa entre a Soldagem com Arame Sólido e Metal Cored no Processo Multipasses. Trabalho de Conclusão de curso de Engenharia Mecânica da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. UNIJUÍ, 2016 Disponível em: <https://bibliodigital.unijui.edu.br/items/e7883a27-068a-44fe-9282-d5e7980b0367> . Acessado em 26 de junho 2025.
- [13] TECHNO-ALLOYS. Catálogo Arame Metal Arc 76 (ER 70S-6). Disponível em: [https://www.techno-alloys.com/site/fichas-tecnicas/aco-carbono-e-baixa-liga/arames/ARAME%20METAL%20ARC%2076%20\(ER%2070S-6\).pdf](https://www.techno-alloys.com/site/fichas-tecnicas/aco-carbono-e-baixa-liga/arames/ARAME%20METAL%20ARC%2076%20(ER%2070S-6).pdf)
- [14] AWS D1.1/D1.1M:2020. An American National Standard. Structural Welding Code-Steel. American National Standards Institute. 24th Edition 2019.
- [15] JOSÉ, R.; FERREIRA, C. A.; MARCH D. G.; FRITZEN, D.; DALEFFE, A.; SCHAEFFER, L. Uso da Manufatura Aditiva por Fusão Localizada na Recuperação de Estampo para Indústria Cerâmica. Revista Vincci – Periódico Científico da UniSATC, v. 9, n. 2, p. 580-595, 2024.
- [16] ASTM INTERNATIONAL. ASTM E8/E8M-15a – Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM International, 2015. Disponível em:

- [https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CE0008\\_E0008M-15A%7Cen-US&proxycl=https%3A%2F%2Fsecure.astm.org&fromLogin=true](https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CE0008_E0008M-15A%7Cen-US&proxycl=https%3A%2F%2Fsecure.astm.org&fromLogin=true). Acessado em: 26 de junho de 2025.
- [17] SOUZA, S. R. de. Ensaios mecânicos de materiais metálicos. 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2019.
- [18] Chen, J., Zhang, Z., Zhang, Z., Liu, Y., Zhao, X., Chen, J., & Chen, H. (2022). Efeito da taxa de resfriamento da simulação térmica na microestrutura e nas propriedades mecânicas do aço bainítico de baixo carbono por soldagem híbrida a laser e arco. *Coatings*, 12 (8), 1045. <https://doi.org/10.3390/coatings12081045>
- [19] MARCH, D. G.; DALEFFE A.; CASAGRANDE, H.; FERREIRA C.; SCHAEFFER, L.; MILANEZ, A. Additive Manufacturing by Arc Deposition: Study of Mechanical and Chemical Properties with Stainless Electrode ER 310. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, Vol. 19 No. 5, 2025. Doi: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n5-138>.
- [20] Neves, A. D. S., Sichi, A., Júnior, A. C. R., Junior, C. D. D. S., Reis, G., Lovati, K. G., Sousa V. D., Cabra, R. D. F. Caracterização mecânica e microestrutural de um aço com baixo teor de carbono – SAE 1010. *Revista Teccen*. 2018 Jan/Jun.; 11 (1): 10-17 Disponível em: [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/76018794/pdf-libre.pdf?1639069564=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DCaracterizacao\\_mecanica\\_e\\_microestrutura.pdf&Expires=1750972267&Signature=E7wAPY7iBzKD6VqqqQRtDp1Rgv2aWaEU~zMgB7tdYWVQ8lDw2Pbns0DQ1palnpu06Rwojbd28xT9ZtpTu3bLKsYa7uLUU38FpeTzkzQZTcx18QoKflsfmnYMso9eOB4nZBZIZR-it0ZrG~iQ8aI2jto6akINlswcTGUppEbc-Hk2BjVF~yKptyIwRIYgD6gHyTD6I0K~M~MT1BAyOrbp1GcCEYjlOd-Ct5cQLhsh9WM2tUN3A6-gwv6TE0~52HhB6fnGrFpNh0JWdMEK6XwNtIaA0sZKFvsCufqrrYFgz5SE58yr6Q9~ZyCJkPMvzouQypfloUwFSmFNqRhRO5poQ\\_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/76018794/pdf-libre.pdf?1639069564=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DCaracterizacao_mecanica_e_microestrutura.pdf&Expires=1750972267&Signature=E7wAPY7iBzKD6VqqqQRtDp1Rgv2aWaEU~zMgB7tdYWVQ8lDw2Pbns0DQ1palnpu06Rwojbd28xT9ZtpTu3bLKsYa7uLUU38FpeTzkzQZTcx18QoKflsfmnYMso9eOB4nZBZIZR-it0ZrG~iQ8aI2jto6akINlswcTGUppEbc-Hk2BjVF~yKptyIwRIYgD6gHyTD6I0K~M~MT1BAyOrbp1GcCEYjlOd-Ct5cQLhsh9WM2tUN3A6-gwv6TE0~52HhB6fnGrFpNh0JWdMEK6XwNtIaA0sZKFvsCufqrrYFgz5SE58yr6Q9~ZyCJkPMvzouQypfloUwFSmFNqRhRO5poQ_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA) Acessado em: 26 de junho de 2025.