

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Daniel Victor Andrade

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTE MISTURAS DE GASES DE
PROTEÇÃO DA JUNTA SOLDADA UTILIZANDO O PROCESSO GMAW**

Betim

2025

DANIEL VICTOR ANDRADE

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES MISTURAS DE GASES DE
PROTEÇÃO DA JUNTA SOLDADA UTILIZANDO O PROCESSO GMAW**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Mendes de Almeida Carvalho

Betim

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

A554a Andrade, Daniel Victor

Análise da influência de diferentes misturas gases de proteção na junta soldada utilizando o processo GMAW / Daniel Victor Andrade. – 2025

57 f.: il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Campus Betim, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Mendes de Almeida Carvalho

Coorientador: Prof. Dr. Flávio Magno de Carvalho Fonseca

1. Solda e soldagem. 2. Gases de proteção. 3. Macrografia. 4. Otimização de custos. 5. Engenharia Mecânica. I. Andrade, Daniel Victor. II. Título.

CDU: 621.791



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Betim
Diretoria de Ensino
Rua Itamarati, 140 - CEP 32677-564 - Betim - MG
3135325921 - www.ifmg.edu.br

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 27 dias do mês de fevereiro do ano de 2025, às 19h00, nas dependências do IFMG - Campus Betim, reuniu-se a banca examinadora presidida por mim, Gabriel Mendes de Almeida Carvalho e demais membros, Prof. Dr. Fagner Guilherme Coelho e Prof. Msc. Ismael Nogueira Rabelo de Melo. Nesta ocasião o discente Daniel Victor Andrade do curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica em, com registro acadêmico de número 0040423 do IFMG – *Campus* Betim, defendeu seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “Análise da influência de diferentes misturas gases de proteção na junta soldada utilizando o processo GMAW” e foi APROVADO, com 90 (noventa) pontos.

Este resultado reflete o cumprimento parcial dos critérios de avaliação estabelecidos pelo curso e reconhece os esforços e a dedicação do discente e seu orientador no desenvolvimento do seu TCC. O lançamento da nota e o consequente encerramento do respectivo processo está condicionado ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa conforme previstos nos regulamentos vigentes. Tais procedimentos pós-defesa devem ser finalizados dentro do prazo limite de 45 dias, a contar da data desta ata. O descumprimento destes procedimentos até a data estipulada implicará em atribuição de nota 0 (zero) e consequente reprovação.

A sessão foi encerrada às 20h00. Para constar, eu, Gabriel Mendes de Almeida Carvalho, redigi a presente ata que após lida publicamente, foi aprovada e assinada pelo discente e membros da banca examinadora.

Assinam esta ata: Gabriel Mendes de Almeida Carvalho, Fagner Guilherme Coelho e Ismael Nogueira Rabelo de Melo.

Betim, 01 de abril de 2025.



Documento assinado eletronicamente por **Gabriel Mendes de Almeida Carvalho, Professor**, em 01/04/2025, às 13:16, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Ismael Nogueira Rabelo de Melo, Professor**, em 01/04/2025, às 13:19, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Fagner Guilherme Ferreira Coelho, Usuário Externo**, em 01/04/2025, às 21:24, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2251041** e o código CRC **9FE9C56B**.

23792.000437/2025-36

2251041v1

Aos meu pais Ana e Joanes,
por todo apoio prestado nessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha família, que esteve ao meu lado ao longo desses anos de curso, me incentivando e me ajudando a enfrentar cada desafio. Ana, Joanes e Pedro, amo vocês.

Aos meus amigos de curso, minha gratidão por todo o apoio e por tornarem essa jornada mais leve e divertida.

À CNH e aos meus colegas de trabalho, agradeço pela oportunidade de desenvolver este estudo, que tanto agregou ao meu crescimento profissional, e pelo apoio e ensinamentos ao longo do caminho.

Por fim, um agradecimento especial a todos os professores que, de alguma forma, contribuíram para minha formação acadêmica e profissional.

Sem vocês, nada disso seria possível.

“Não importa o quão ruim fique ou o quão perdido você se sinta, me prometa que terá esperança. Mantenha-a viva. Temos que ser maiores do que o que sofremos. Meu desejo para você é que se torne esperança.”

(Gwen Stacy)

Filme: O Espetacular Homem Aranha – A ameaça de Electro

RESUMO

Este trabalho aborda o processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) e investiga a influência de diferentes misturas de gases de proteção na qualidade e morfologia do cordão de solda. O estudo justifica-se pela necessidade de reduzir custos industriais e otimizar a utilização de gases como Argônio, Dióxido de Carbono e Oxigênio, avaliando o impacto dessas misturas em aspectos mecânicos e visuais do cordão. A pesquisa foi realizada em parceria com a CNH Brasil, utilizando soldagem robotizada para garantir precisão e uniformidade nos testes. Foram analisadas três composições de gases, incluindo a mistura padrão da empresa e outras formulações potencialmente mais econômicas. Os ensaios realizados foram visuais e envolveram macrografia para avaliar as condições da solda obtida e conformidade das soldas com padrões industriais. Os resultados apontaram diferenças significativas na geometria dos cordões e na viabilidade de substituição dos gases utilizados, destacando a mistura mais eficiente em termos de custo-benefício e qualidade técnica. As conclusões contribuem para a otimização de processos de soldagem em escala industrial.

Palavras-chave: Soldagem GMAW; Gases de Proteção; Morfologia de Solda; Macrografia; Otimização de custos

ABSTRACT

This work addresses the Gas Metal Arc Welding (GMAW) process and investigates the influence of different shielding gas mixtures on the quality and morphology of the weld bead. The study is justified by the need to reduce industrial costs and optimize the use of gases such as Argon, Carbon Dioxide, and Oxygen, evaluating the impact of these mixtures on the mechanical and visual aspects of the weld bead. The research was conducted in partnership with CNH Industrial Brasil, using robotic welding to ensure precision and uniformity in the tests. Three gas compositions were analyzed, including the company's standard mixture and other potentially more cost-effective formulations. The tests conducted were visual and involved macrography to assess the condition of the obtained weld and the compliance of the welds with industrial standards. The results indicated significant differences in bead geometry and the feasibility of replacing the gases used, highlighting the most efficient mixture in terms of cost-effectiveness and technical quality. The conclusions contribute to the optimization of welding processes on an industrial scale.

Keywords: GMAW Welding; Shielding Gases; Weld Morphology; Macrography; Cost Optimization

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Evolução dos Processos de Soldagem.	19
Figura 2 – Soldagem MIG/MAG (esquemática).....	20
Figura 3 – Representação dos valores de onda do GMAW pulsado.	21
Figura 4 – Principais parâmetros do GMAW pulsado.	21
Figura 5 – Ciclo térmico de soldagem	23
Figura 6 – Regiões de solda em função da variação de temperatura.....	23
Figura 7 – Perfil típico de cordões de soldados com diferentes gases de proteção..	26
Figura 8 – Macrografia de uma solda filete.	27
Figura 9 – Perfis adequados de solda filete.	28
Figura 10 – Indicação de inclusão de escória.....	28
Figura 11 – Indicação de falta de fusão.....	29
Figura 12 – Indicação de trinca no cordão de solda	29
Figura 13 – Robô de Solda Quirox QRC 350	30
Figura 14 – Máquina de Solda Modelo GLC 603 QUINTO.....	31
Figura 15 – Ilustração da secção da região de solda do corpo de Prova de solda filete. A) lado “A”: solda cordão único, composta pelo passe de cordão 1; B) lado “B”: solda multipasses, composta pelos passes de cordão 2, 3 e 4.	33
Figura 16 – Ilustração da secção da região de solda do corpo de Prova de solda de Topo, composta pelos passes de cordão 1 e 2.....	34
Figura 17 – Posicionamento para extração dos corpos de prova da solda de filete.	34
Figura 18 – Posicionamento para extração dos corpos de prova da solda de topo ..	35
Figura 19 – Microscópio Olympus Stream Basic modelo SZ61	36
Figura 20 – Perfis adequados de solda filete multipasses. As medidas indicadas representam respectivamente A) Perna horizontal; B) Perna vertical; C) Penetração horizontal mínima e máxima; D) Penetração vertical mínima e máxima; E) Garganta teórica; F) Garganta efetiva; G) Contorno da área do cordão.	37
Figura 21 – Perfis adequados de solda de topo. As medidas indicadas representam respectivamente A) Largura do cordão; B) Altura do reforço do cordão; C) contorno da área do cordão	38
Figura 22 – Macrografias dos cordões de solda filete passe único.....	41

Figura 23 – Macrografias dos cordões de solda filete multipasses.....	45
Figura 24 – Macrografias dos cordões de solda filete multipasses.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Misturas de gases que serão estudados e seu percentual de cada gás.	32
Tabela 2 – Comparação de custo entre as misturas	32
Tabela 3 – Nomenclaturas dos corpos de prova para ensaio de macrografia.	35
Tabela 4 – Parâmetros de soldagem para cada CP.....	39
Tabela 5 – Dimensões dos cordões de solda fileta passe único.	41
Tabela 6 – Dimensões dos cordões de solda filete multipasses.....	46
Tabela 7 – Dimensões médias dos cordões de solda de topo.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

Ar – Argônio

AWS – *American Welding Society*

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CO₂ – Dióxido de Carbono

CP – Corpo de Prova

GMAW - *Gas Metal Arc Welding* (Soldagem a Arco com Eletrodo Consumível e Proteção Gasosa)

He – Hélio

IFMG - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais

MAG – *Metal Active Gas*

MIG – *Metal Inert Gas*

NBR - Normas Técnicas Brasileiras

O₂ – Oxigênio

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso

ZF – Zona Fundida

ZTA – Zona Termicamente Afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

I_p	Corrente de pico
t_p	Tempo de corrente de pico
I_b	Corrente de fundo
t_b	Tempo de corrente de fundo
t_f	Temperatura de fusão
t_t	Temperatura de tratamento
I_{av}	Corrente média
T_p	Temperatura de Pico
T_c	Tempo de permanência
Φ	Velocidade de resfriamento
T	Temperatura da curva de resfriamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	15
1.2	Colocação do Problema.....	16
1.3	Objetivos.....	16
1.4	Organização do Trabalho.....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Soldagem.....	18
2.2	Processo GMAW	19
2.3	Soldagem Pulsada.....	20
2.4	Macroestrutura de Soldas Por Fusão	22
2.5	Gases de Proteção	24
2.6	Macrografia	26
2.7	Descontinuidades e defeitos	27
3	METODOLOGIA	30
3.1	Recursos.....	30
3.2	Definição das Misturas de Gases de Proteção.....	31
3.3	Definição dos Corpos de Prova.....	33
3.4	Macrografia	36
3.5	Morfologia do cordão.....	37
3.6	Parâmetros de soldagem.....	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1	Macrografia solda filete passe simples	40
4.2	Macrografia de solda filete multipasses	45
4.3	Macrografia de solda de topo.....	49
5	CONCLUSÃO	52
6	REFERÊNCIAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem é amplamente utilizado em diversas áreas industriais e o processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) em específico pode ser aplicado com uma ampla gama de consumíveis que dão ao cordão de solda as características necessárias para cada aplicação. Um dos consumíveis mais importantes no processo GMAW é o Gás de Proteção.

A morfologia do cordão de solda está diretamente relacionada com a utilização de diferentes gases ou misturas gasosas de composições diferentes. As dimensões e formatos obtidos são de fundamental importância pois dão a junta soldada a resistência necessária para cada aplicação.

Além disso, a utilização dos gases de proteção influencia no custo da manufatura em uma indústria, uma vez que cada gás tem seu custo específico e são utilizados em diferentes quantidades para obtenção de uma solda de qualidade.

Para garantir que uma solda foi realizada com qualidade, ela deve ser submetida a testes de qualificação indicados pela norma adotada, conhecidos como ensaios de qualidade. Esses ensaios podem ser destrutivos, como o ensaio de tração ou a macrografia, ou não destrutivos, como o ensaio por líquido penetrante e por partícula magnética.

Este estudo tem como objetivo avaliar o comportamento de diferentes misturas de gases de proteção na poça de fusão da solda e no cordão de solda, através de ensaios visuais, para determinar a possibilidade de mudança do gás utilizado no processo produtivo da CNH Brasil, planta de Contagem-MG.

1.1 Justificativa

Devido às diferentes escassezes de gases utilizados nas misturas e diferentes demandas de mercado, os custos de cada gás podem variar significativamente. Com isso, os custos de cada mistura dos gases de proteção variam de acordo com a proporção dos gases nelas utilizados.

Mesmo o processo GMAW sendo, nos dias de hoje, bastante conhecido e dominado, a aplicação de testes em Corpos de Prova é exigida por norma para validar os parâmetros de soldagem com determinado Gás de Proteção para que este seja utilizado nos processos industriais.

Com a necessidade de reduzir custos de processos de manufatura e, sabendo dessas variações, será realizado um estudo das influências de três misturas gases de proteção diferentes no cordão de solda, sendo uma delas a mistura de processo corrente e duas misturas com proporções que permitam redução de custo. Os Corpos de Provas de material ASTM A572 serão soldados utilizando diferentes proporções dos gases Argônio (Ar), Dióxido de Carbono (CO₂) e Oxigênio (O₂) sendo elas definidas e elencadas no tópico 3.2 de Definição das Misturas de Gases de Proteção.

1.2 Colocação do Problema

A utilização de diferentes misturas gasosas no processo de soldagem GMAW pode influenciar significativamente a qualidade e o custo da solda, sendo estas variáveis críticas para a manutenção da competitividade industrial. Embora o processo seja amplamente conhecido e utilizado, a diversidade de aplicações e as constantes demandas por eficiência técnica e financeira geram a necessidade de estudos mais aprofundados. A questão central que guia este trabalho é: “É possível otimizar o processo de soldagem através da substituição da mistura de gases de proteção atualmente utilizada, mantendo a qualidade do cordão de solda e reduzindo custos?”. Para responder a essa pergunta, busca-se investigar os impactos de diferentes composições gasosas na morfologia do cordão de solda, nas propriedades mecânicas da junta soldada e nos custos do processo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência de misturas de gases de proteção em diferentes proporções no cordão de solda e entender a viabilidade da aplicação destes gases.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar os tipos de junta para validar o processo com as determinadas proporções de gases de proteção;
- b) Avaliar impacto mecânico, aspecto visual e morfológico gerado com a variação dos gases de proteção;

- c) Comparar os resultados a fim de definir vantagens e desvantagens de cada mistura de gases;
- d) Comparar os custos de utilização de cada uma das misturas;
- e) Definir quais das misturas de gases de proteção podem ser aplicadas no processo.

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos principais. No Capítulo 1, são apresentadas a introdução ao tema, a colocação do problema, os objetivos gerais e específicos, e a justificativa para a realização do estudo. O Capítulo 2 compreende a fundamentação teórica, abordando os conceitos básicos de soldagem, o processo GMAW, suas variações e os aspectos relacionados ao uso de gases de proteção. No Capítulo 3, é detalhada a metodologia utilizada no estudo, incluindo a definição das misturas de gases, a descrição dos corpos de prova e os procedimentos experimentais. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e a discussão sobre os impactos das misturas gasosas analisadas. Por fim, no Capítulo 5, é apresentada a conclusão, na qual são destacadas as principais observações do estudo, as limitações encontradas e as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem o objetivo de apresentar as principais bases teóricas divulgadas no meio científico para a melhor compreensão do trabalho realizado e certificar que os resultados serão devidamente embasados para uma conclusão clara e assertiva. Ele foi dividido em 8 partes buscando apresentar os principais conceitos de soldagem, suas variações e parâmetros que podem impactar diretamente no processo de soldagem além de uma breve caracterização das juntas soldadas que permitem o correto entendimento dos possíveis defeitos em um cordão de solda.

2.1 Soldagem

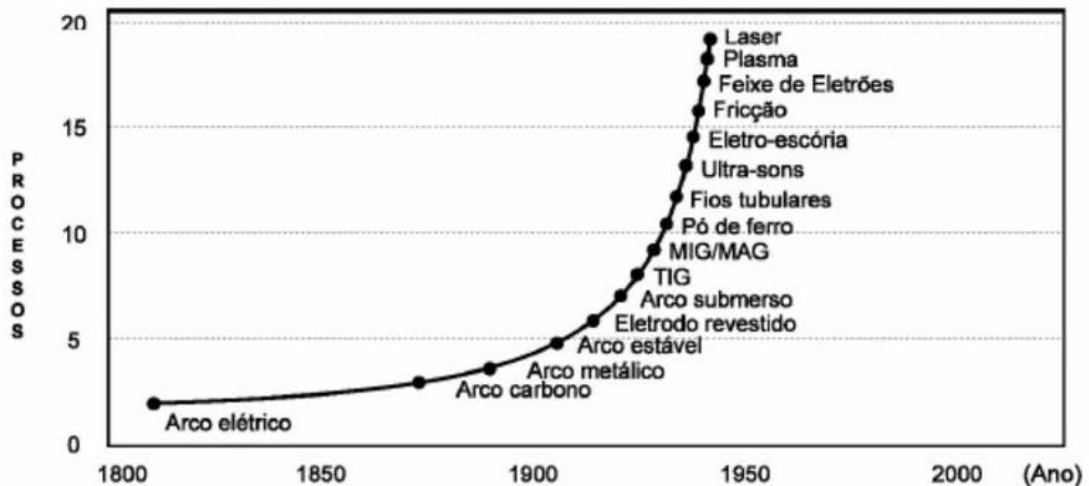
Soldagem é um dos processos de união permanente de metais mais utilizados na indústria, principalmente quando há necessidade de alta resistência na região da união e/ou quando se tem de obter uma junta impermeável por fluidos. Sua versatilidade e capacidade produtiva permite a fabricação dos mais diversos componentes, fazendo com que este processo seja foco de estudo em todo o mundo há séculos.

Sua classificação, segundo Geary e Miller (2013), é definida como um processo de união de duas ou mais peças de metal, de tal modo que resulte em uma peça tão resistente quanto o metal original. Já Wainer, Brandi e Mello (1992) definem como um processo de duas ou mais partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão.

Embora a soldagem nos dias de hoje seja conhecida como um processo altamente tecnológico e preciso, envolvendo energia elétrica, máquinas inversoras com regulagens precisas e componentes construídos com os melhores materiais para cada tipo de processo, ela “foi também usada, na antiguidade e na idade média, para a fabricação de armas e outros instrumentos cortantes. Isto ocorreu porque o ferro obtido por redução direta tem um teor de carbono muito baixo (inferior a 0.1%), não sendo, portanto, endurecível por têmpera.”. (MODENESI, MARQUES E SANTOS, 2012)

Apesar de ter tido seu início na antiguidade, a soldagem como hoje é conhecida teve seu advento durante a II Guerra Mundial em virtude da alta demanda de fabricação de navios e aviões de guerra (Wainer, Brandi e Mello, 1992). Com o desenvolvimento do arco elétrico diversos processos de soldagem puderam ser criados e aperfeiçoados. A Figura 1 ilustra o desenvolvimento dos principais modelos de processos de soldagem ao longo do tempo.

Figura 1 – Evolução dos Processos de Soldagem.



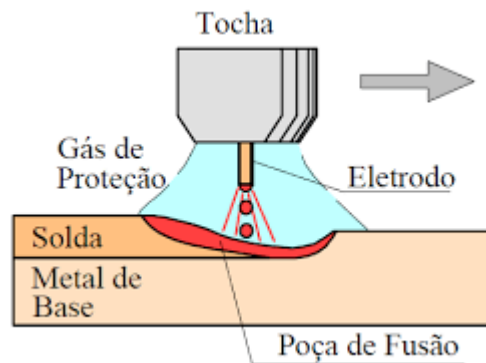
Fonte: Wainer, Brandi e Mello (1992)

2.2 Processo GMAW

Um dos principais processos de soldagem, e foco do estudo deste trabalho, o processo GMAW, ilustrado na Figura 2, é um processo de soldagem extremamente comum em indústrias de todo porte e áreas principalmente quando há uma alta demanda de produção. Este processo tem como principais características a alimentação constante de metal de adição e a necessidade de utilização de um gás de proteção da poça de fusão, podendo este ser inerte ou ativo, dando origem aos nomes populares MIG (*Metal Inert Gas*) e MAG (*Metal Active Gas*) como validam os autores Modenesi, Marques e Bracarense na citação abaixo.

A soldagem a arco com proteção gasosa [...] é um processo em que a união de peças metálicas é produzida com o aquecimento destas com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu, consumível, e a peça de trabalho. A proteção do arco e da região de solda contra a contaminação pela atmosfera é feita por um gás ou mistura de gases, que podem ser inertes ou ativos. No Brasil o processo é conhecido como MIG (*Metal Inerte Gas*) quando a proteção usada é inerte ou rica em gases inertes ou MAG (*Metal Active Gas*) quando a mistura é ativa ou rica em gases ativos. (Modenesi, Marques e Bracarense, 2011, p. 233)

Figura 2 – Soldagem MIG/MAG (esquemática)



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2011)

Modenesi, Marques e Bracarense (2011) destacam como principais vantagens do processo MIG/MAG a alta taxa de deposição e o elevado tempo de ocupação do soldador, também chamado de fator de trabalho. Devido a essas características, os fabricantes frequentemente escolhem esse processo quando há demanda por produção em série ou pela aplicação de cordões longos e reforçados.

A versatilidade do processo GMAW também é outro fator que chama a atenção do ramo industrial, podendo este ser manual ou automatizado. Machado (1996) comenta que esta flexibilidade de aplicações se deve ao baixo conteúdo de hidrogênio no metal de solda, a maior taxa de deposição e fator de operação, a facilidade de operação e também a conveniência para robotização.

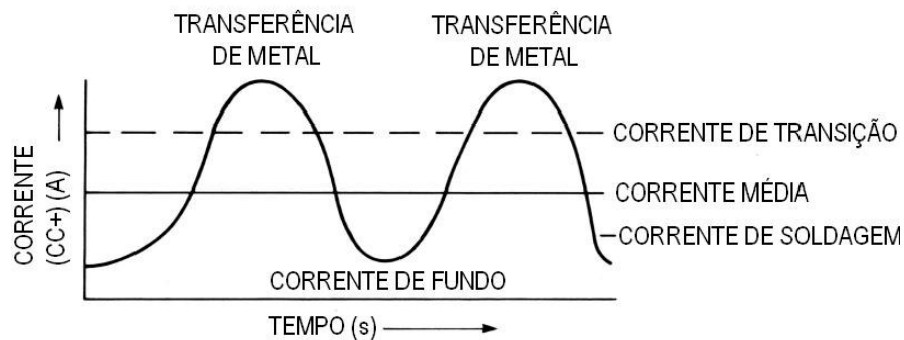
Outra vantagem da utilização do processo MIG/MAG é a capacidade de soldagem de uma ampla faixa de espessura além da possibilidade de soldagem de metais ferrosos e não ferrosos sendo o processo MAG utilizado em metais ferrosos e o processo MIG podendo ser utilizado em ambos os materiais. Marques, et al., 2011.

2.3 Soldagem Pulsada

A transferência metálica na soldagem é um fator determinante na qualidade e eficiência do processo, influenciando a formação do cordão, a penetração e a estabilidade do arco. Dentre os diferentes modos de transferência do processo GMAW se destaca uma variação técnica chamada soldagem sulsada. A transferência pulsada se destaca por proporcionar maior controle da fusão, reduzindo respingos e melhorando a deposição, sendo especialmente vantajosa para soldagens em diferentes posições e materiais sensíveis.

Neste modo de transferência metálica, a corrente elétrica percorrida no eletrodo consumível é variada entre um valor alto (corrente de pico) e um valor baixo (corrente de base ou de fundo) ficando estes respectivamente acima e abaixo da corrente de transição (valor no qual ocorre a formação de gota) conforme ilustrado na Figura 3 (ESAB, 2005). O período de corrente de base deve ser suficiente para manter o arco aberto e serve para reduzir a corrente média.

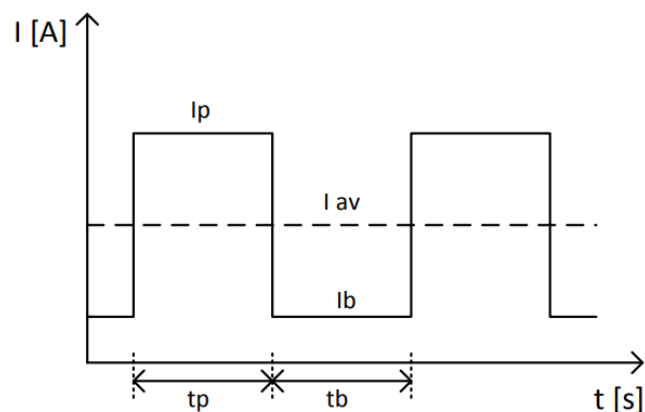
Figura 3 – Representação dos valores de onda do GMAW pulsado.



Fonte: ESAB (2005)

A soldagem pulsada se trata de uma variação do processo GMAW convencional, Pépe (2010) caracteriza o processo como uma forma de onda complexa na qual diferentes parâmetros afetam a transferência global e as características da solda. Os principais parâmetros do GMAW pulsado são a corrente de pico (I_p) e seu tempo (t_p) e a corrente de fundo e seu tempo (I_b) e (t_b), estes parâmetros são ilustrados pela Figura 4. A Figura indica também o valor de corrente média (I_{av}) encontrado entre os valores de corrente de pico e de base.

Figura 4 – Principais parâmetros do GMAW pulsado.



Fonte: Pépe (2010)

Os parâmetros mais importantes da corrente de pulso são a I_p e o t_p (Matsuda, Ushio, & Tanaka, 1983). Segundo os autores, é nessa faixa de corrente que a gota é formada, sendo seu desprendimento na fase de corrente mais baixa. Estes dois principais parâmetros juntamente a alimentação do arame a condição e por conseguinte, o tamanho da gota.

Uma das desvantagens da corrente pulsada é a grande quantidade de parâmetros a serem regulados para melhor controle da solda. Conforme apresentado por Fisher (2011), as correntes de pico e corrente de base (I_p e I_b), além da frequência de pulsação e do DBCP, podem influenciar diretamente no comprimento do arco e na transferência do metal

2.4 Macroestrutura de Soldas Por Fusão

Marques, Modenesi e Bracarense (2011) afirmam que, na poça de fusão, o metal de adição e o metal de base são fundidos e misturados, sendo que a composição química final da ZF resulta da proporção entre ambos. Com base nessa afirmação e nos conceitos de soldagem apresentados por Gary e Miller, pode-se concluir que as propriedades mecânicas da junta soldada tendem a ser iguais ou melhores que a do metal de base antes da soldagem.

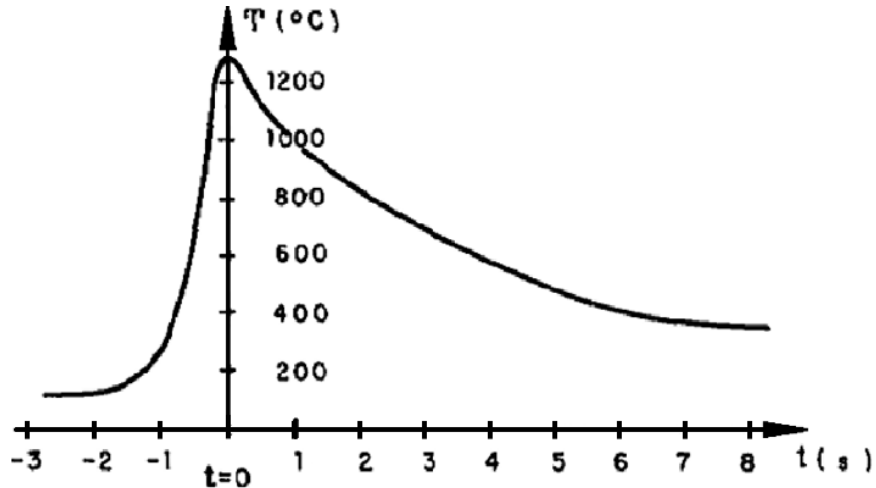
Porém, como afirmam Marques, Modenesi e Bracarense, “a maioria dos processos de soldagem causa, nas partes que estão sendo unidas, variações de temperatura e deformações plásticas que resultam em alterações na estrutura da junta sendo soldada e, portanto, de suas propriedades”. Dessa forma a soldagem pode ser considerada um tratamento termomecânico no qual os aspectos metalúrgicos do material devem ser considerados.

Ainda Marques, Modenesi e Bracarense definem algumas características importantes no ciclo térmico da Soldagem:

- Temperatura de Pico (T_p): é a maior temperatura atingida no ponto e indica a possibilidade de transformações microestruturais;
- Tempo de Permanência (T_c) acima de uma temperatura crítica: tempo total em que a região esteve acima de uma temperatura necessária para transformação microestrutural;
- Velocidade de Resfriamento (ϕ): é a derivada (ou inclinação) de uma determinada Temperatura (T) da curva de resfriamento. Essa característica é importante pois os produtos da transformação da austenita dependem da condição de resfriamento.

A Figura 5 nos apresenta o ciclo térmico da soldagem, sendo o $t = 0$ o ponto T_p , o tempo negativo representa a fase de aquecimento e o tempo positivo a fase de resfriamento.

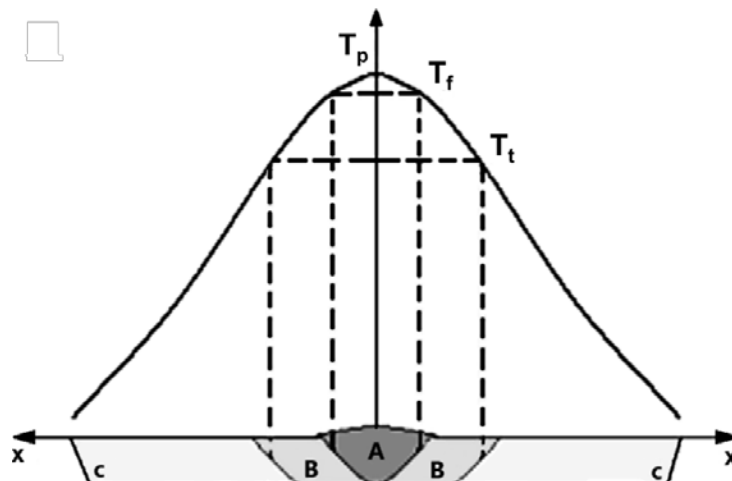
Figura 5 – Ciclo térmico de soldagem



Fonte: Wainer, Brandi e Melo (1992)

A variação de temperatura na solda nos permite definir três principais regiões como ilustrado na Figura 6. Estas regiões são delimitadas pelas Temperaturas de Fusão (T_f), atingida na região A que foi fundida no processo de soldagem, Temperatura de Tratamento (T_t), atingida pela região B, que representa a ZTA. A Temperatura de Pico é representada pela sigla T_p .

Figura 6 – Regiões de solda em função da variação de temperatura. Região A: Zona Fundida; Região B: Zona Termicamente Afetada; Região C: Metal de base.



Fonte: Felizardo (2016)

2.5 Gases de Proteção

Considerado um consumível de solda, o principal elemento de estudo deste trabalho tem uma colaboração fundamental na qualidade da solda realizada. O gás de proteção utilizado nas juntas tem a função principal de expulsar os gases atmosféricos impedindo que contaminem a poça de fusão. Os principais elementos presentes na atmosfera que são causadores dessa contaminação são o Nitrogênio (N_2), o Oxigênio (O_2) e o vapor d'água (H_2O). (ESAB, 2005)

Como já introduzido, os gases de proteção podem partir de duas naturezas, Inertes ou Ativos ou ainda uma mistura dessas variações. Os principais gases utilizados em soldagens MIG são Argônio (Ar) ou Hélio (He) podendo ser puros ou uma mistura rica nestes gases, estes elementos são comumente utilizados na soldagem de materiais não ferrosos, aços inoxidáveis, aços carbono e aços de baixa liga. (Felizardo, 2016)

Dentre as principais possibilidades de gases inertes o Argônio geralmente leva vantagem na escolha do gás de proteção para soldas dos não ferrosos, o principal motivo segundo Machado (1996) e Felizardo (2016) é o alto custo para empregar o Hélio como gás de proteção. A escassez e a dificuldade de obtenção são fatores que influenciam no alto custo. Os autores também evidenciam a diferença de densidade dos gases, sendo o Ar cerca de 10 vezes mais denso que o He, o que implica na necessidade de uma vazão de 2 a 3 vezes maior quando empregado o He para equiparar a proteção do Ar.

A diferença de potencial existente entre o eletrodo e o metal de base, aliado ao potencial de ionização do gás de proteção, gera elementos positivamente carregados que liberam elétrons. Esta movimentação de elétrons através do gás é responsável pela geração de calor e transferência de metal para a poça de fusão, quanto menos a energia de ionização, menor a diferença de potencial necessária para gerar o arco. Devido ao baixo potencial de ionização o Argônio possui uma boa estabilidade do arco e boa transição de corrente. Como exemplificado por ESAB (2005), “o argônio produz uma coluna de arco estreita a uma alta densidade de corrente que faz com que a energia do arco fique concentrada em uma pequena área. O resultado é um perfil de penetração profunda possuindo a forma de um dedo”. O perfil típico é exemplificado na Figura 7.

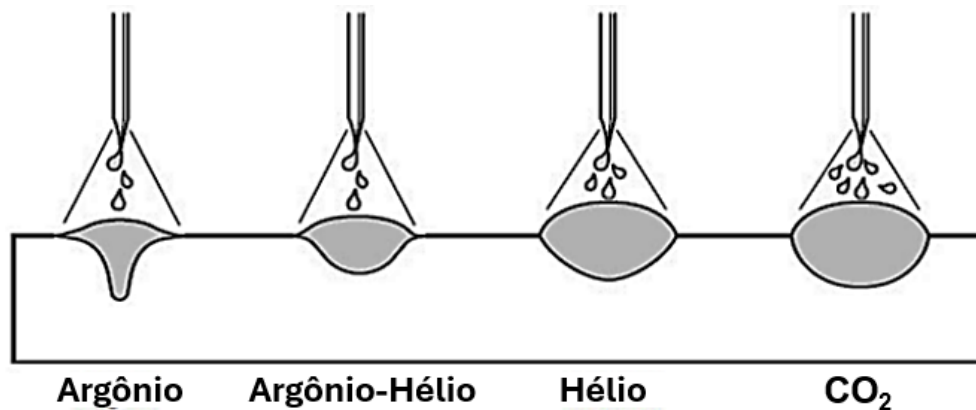
Os gases inertes, portanto, têm grande atratividade na maioria dos casos, entretanto, de acordo com Machado (1996), para a soldagem dos aços deve-se adicionar na mistura elementos oxidantes (O_2 ou CO_2). Para soldagens MAG, em metais ferrosos, novamente Felizardo (2016) afirma que o Dióxido de Carbono (CO_2) é o principal gás ativo podendo este também ser puro ou o principal elemento de uma mistura geralmente adicionada de O_2 . A adição desses elementos reduz o respingo, aumentando a taxa de deposição devido a menor perda de material no processo de soldagem, através da ação sobre a tensão superficial e intensificação da ionização, além de aumentar sensivelmente a fluidez da poça de fusão, resultando num cordão com geometria conivente. (Moreira, 2008)

Outra característica favorável ao CO_2 também apresentado por Moreira (2008) é a de dar ao cordão de solda um formato mais largo e arredondado além de menos alto e mais profundo, fator este que está possivelmente relacionado a maior transferência de calor para o metal de base, impulsionado pelo próprio gás utilizado. (Almeida, Piovesan, Souza, & Kuntz, 2018)

Estes gases ativos, como complementado por (Modenesi, Marques, & Santos, 2012), podem se dissociar na forma atômica, na superfície do metal líquido, e serem incorporados na poça de fusão. Os autores evidenciam também que estas absorções podem ter como consequência a formação de descontinuidades, sendo vital minimizar o contato do metal fundido com estes gases ou, de outra forma, adotar medidas como incrementar elementos que farão a reação com os contaminantes impedindo de serem dissolvidos pelo metal fundido, entretanto, como apresentado no artigo dos autores Almeida, Piovesan, Souza e Kuntz (2018), uma mistura mais rica em CO_2 pode gerar uma quantidade maior de escória de solda, o que pode elevar os custos de produção visto a necessidade de limpeza da região soldada.

Cada gás implica em diferentes formas de deposição do metal de adição, podendo inclusive impactar na penetração e no aspecto do cordão de solda conforme ilustrado na Figura 7 através da seção transversal de gases inertes.

Figura 7 – Perfil típico de cordões de soldados com diferentes gases de proteção.



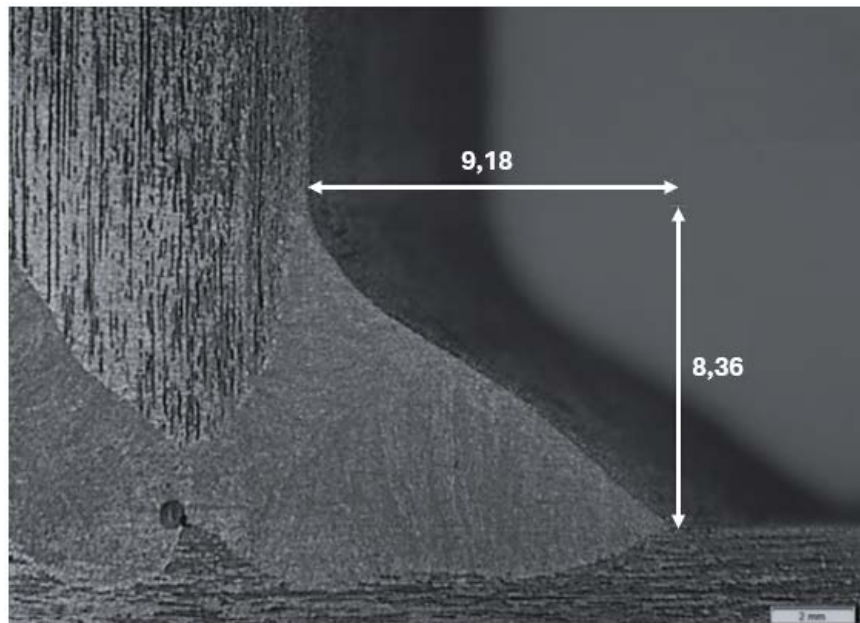
Fonte: Costa (2018) - Disponível em: <https://www.sumig.com/pt/blog/post/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-processo-de-soldagem-mig-mag>. Acesso em 25 de janeiro de 2025.

2.6 Macrografia

Embora ensaios como o líquido penetrante e o ultrassom permitam a identificação de algumas descontinuidades no material, a análise de certos aspectos do cordão de solda exige a observação interna do material em pontos específicos ao longo de sua extensão. Nesse contexto, a macrografia se destaca como o principal ensaio para essa avaliação.

Se tratando de um ensaio destrutivo, devido a necessidade de corte da peça, este ensaio permite a visualização bidimensional de uma seção plana da junta soldada com o objetivo de observar as condições dimensionais e, até mesmo identificar possíveis descontinuidades e defeitos. O aporte térmico da solda causa a fusão também do material de base, a profundidade dessa fusão, chamada penetração, é um dos aspectos pretendidos e pode ser observada na macrografia da Figura 8. Segundo Colpaert (2008), a macrografia é um método de inspeção que envolve a análise de uma peça ou amostra por meio de uma seção plana, previamente polida e, geralmente, submetida a um ataque químico com um reagente adequado. Ainda segundo o autor a macrografia se refere a reprodução da macroestrutura do material com ampliação máxima de 10 vezes.

Figura 8 – Macrografia de uma solda filete.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

2.7 Descontinuidades e defeitos

Assim como outros processos industriais o processo de soldagem está sujeito a variações. Estas variações, chamadas descontinuidades, e que podem ser aceitas ou não de acordo com o exigido para a junta em questão, são influenciadas pelos parâmetros de soldagem e pela qualidade dos equipamentos e materiais utilizados no processo.

De acordo com Modenesi (2001), descontinuidade é definida como qualquer interrupção na estrutura de uma junta soldada. Dessa forma, a falta de homogeneidade nas características físicas, mecânicas ou metalúrgicas do material ou da solda é considerada uma descontinuidade. Quando uma descontinuidade não é aceita dentro dos critérios estabelecidos, é classificada como um defeito.

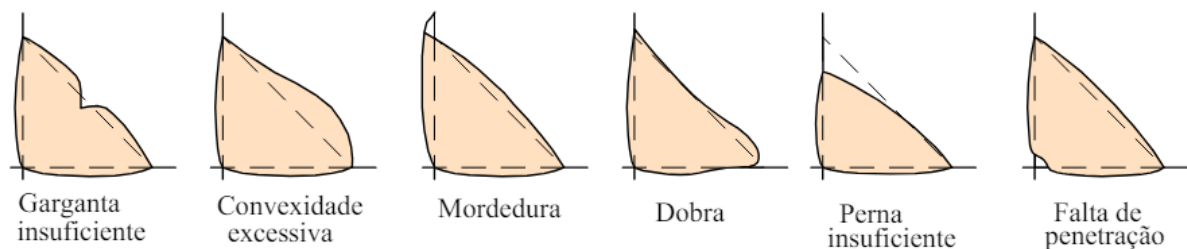
Com base no material “Soldagem I – Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldadas” de Modenesi (2001), as principais descontinuidades a serem avaliadas ao longo deste estudo são apresentadas nos tópicos a seguir.

- Perfil do Cordão: geometria do perfil do cordão gerado no processo de soldagem das juntas em questão. A Figura 9 exemplifica algumas inadequações de solda filete;
- Porosidade: “é formada pela evolução de gases, na parte posterior da poça de fusão, durante a solidificação da solda. Também

segundo o autor, contaminações por sujeira, oxidação, umidade e perturbações na proteção gasosa estão dentre as principais causas na formação de porosidade;

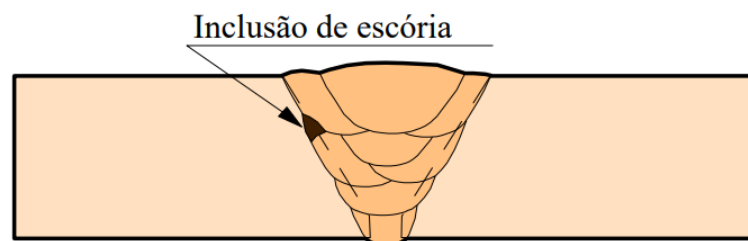
- Inclusão de Escória: é o termo utilizado para descrever partículas de óxidos e outros sólidos que durante o processo de soldagem ficaram aprisionados no cordão de solda. A Figura 10 traz um exemplo de inclusão de escória entre passes de uma junta de topo;
- Falta de Fusão: termo referente a não união por fusão entre passes ou entre o material de adição e o metal de base, a Figura 11 ilustra a descontinuidade por falta de fusão;
- Falta de Penetração: é a falha referente ao não preenchimento completo da raiz ou junta soldada, conforme exemplificado na Figura 9;
- Trincas: por serem fortes concentradores de tensão, são consideradas as descontinuidades mais graves em uma junta soldada. São resultado da atuação de tensões de tração sobre um material incapaz de resistir a elas. A Figura 12 apresenta uma trinca gerada em uma junta soldada.

Figura 9 – Perfis adequados de solda filete.



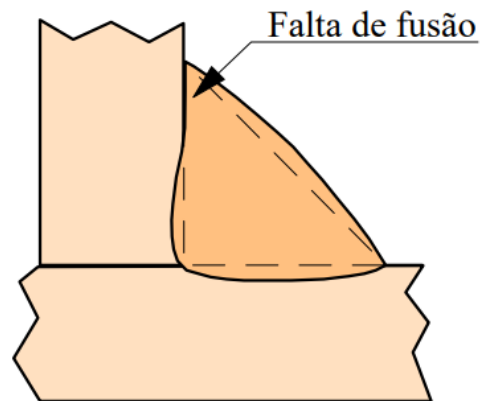
Fonte: Modenesi (2001)

Figura 10 – Indicação de inclusão de escória.



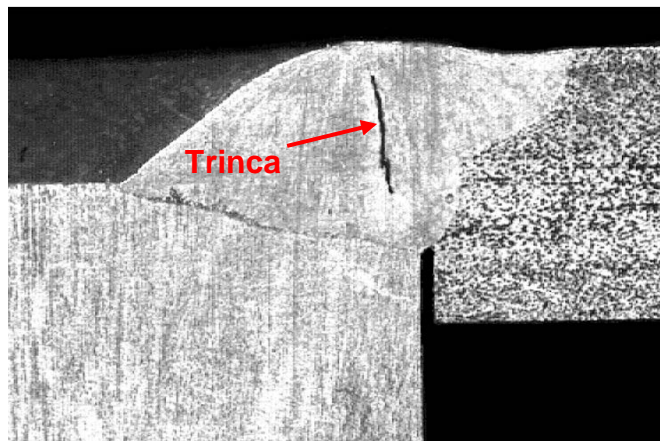
Fonte: Modenesi (2001)

Figura 11 – Indicação de falta de fusão



Fonte: Modenesi (2001)

Figura 12 – Indicação de trinca no cordão de solda



Fonte: Modenesi (2001)

3 METODOLOGIA

Para o estudo, foram selecionados duas das principais misturas de gases de proteção de solda utilizados em processos industriais, além da atual mistura utilizada no processo como já apresentado na Tabela 1, a fim de comparar a influência destas no cordão de solda e no metal de base.

Com intuito de manter a fidelidade do estudo, todos os testes foram realizados no mesmo dia pelos mesmos equipamentos e acompanhados pelas mesmas pessoas. Os metais de base, os tipos de junta e o material de adição também foram mantidos os mesmos em todos os Corpos de Prova para que fosse possível avaliar o impacto das misturas gasosas de forma isolada.

3.1 Recursos

A fim de se ter uma melhor confiança e precisão nos resultados foi definido que toda a execução de soldagem dos Corpos de Prova seria realizada através de uma célula robótica disponibilizada pela empresa CNH Industrial

O Robô da marca Cloos utilizado, apresentado na Figura 13, de modelo *Quirox QRC 350*, realizou a solda e apresentou os valores dos parâmetros durante a soldagem, os valores foram registrados em planilhas para avaliação juntamente aos ensaios de cada CP.

Figura 13 – Robô de Solda Quirox QRC 350



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

A Figura 14 apresenta a máquina de solda utilizada, modelo *GLC 603 QUINTO*, também da marca Cloos, realiza o processo de solda GMAW pulsada, esta variação de processo dá ao cordão de solda melhores aspectos e melhor controle no processo com menos respingos e maior profundidade de cordão.

Figura 14 – Máquina de Solda Modelo GLC 603 QUINTO



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Após realização das soldas, foram feitas análises dos CP's utilizando o ensaio de macrografia. Com este ensaio será possível visualizar a seção do cordão de solda e qual foi sua influência na junta, identificando os impactos gerais causados na morfologia da junta.

3.2 Definição das Misturas de Gases de Proteção

A definição de quais misturas utilizar no estudo é de suma importância pois como já apresentado, os gases de proteção têm influência direta na qualidade do cordão de solda. A primeira mistura é a já utilizada no processo corrente da empresa cuja composição é de 90% Ar + 8% CO₂ + 2% O₂.

Para as demais misturas de gases de proteção a serem utilizados nos testes foram tomados como base em alguns estudos em literaturas, como a afirmação

de Machado (1996), na qual informa que para melhor geometria do cordão e menor emissão de respingos deve-se adicionar CO₂ na mistura.

Outra motivação para a dedução das misturas é que o Argônio deve ser o principal elemento pois, conforme afirmam Machado (1996) e Felizardo (2016), a Hélio apresenta maior custo de utilização.

Além disso devido ao gás já utilizado no processo ser rico em Ar fica mais fácil a adaptação dos soldadores e não há custos de implementação.

Por último, a redução de custo de processos também seria uma motivação para escolha das misturas a serem testadas. De acordo com os valores de aquisição dos gases, até a data de publicação deste trabalho, o valor do metro cúbico do CO₂ é 46% mais barato que o valor do metro cúbico do Ar. Essa comparação sugere que um aumento no percentual de CO₂ na mistura deve diminuir o custo.

Duas das misturas mais comuns no mercado, e que atendem as argumentações apresentadas, são compostas por 90% Ar e 10% CO₂, e outra com uma porcentagem um pouco maior de CO₂ é a com 82% Ar e 18% CO₂. Assim sendo, serão estudadas as misturas conforme apresentadas na Tabela 1 de acordo com a nomenclatura padrão definida da norma AWS A5.32M-97. A Tabela 2 apresenta a comparação de custo das duas misturas selecionadas para avaliação com relação ao gás de processo corrente.

Tabela 1 – Misturas de gases que serão estudados e seu percentual de cada gás.

Mistura	% de Argônio	% de Dióxido de Carbono	% de Oxigênio
SG-ACO 8/2	90	8	2
SG-AC 10	90	10	0
SG-AC 18	82	18	0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Tabela 2 – Comparação de custo entre as misturas

Mistura	Comparação de custo
SG-ACO 8/2	0
SG-AC 10	1%
SG-AC 18	-56%

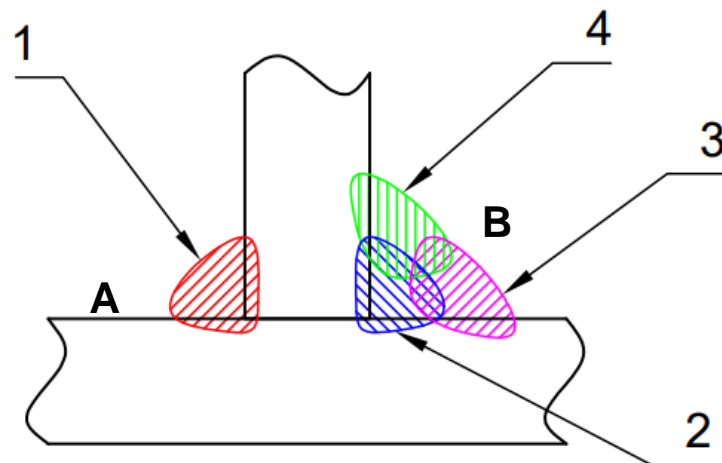
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

3.3 Definição dos Corpos de Prova

Para realização da soldagem nos CP's foram definidas duas geometrias de juntas que fossem mais semelhantes a maioria das juntas do processo da empresa. Após estudo das normas vigentes e dos desenhos das peças fabricadas na empresa se observou que as juntas de filete e de topo, destacadas nas Figuras 15 e 16, seriam mais próximas as juntas de soldagem já existentes no processo de fabricação.

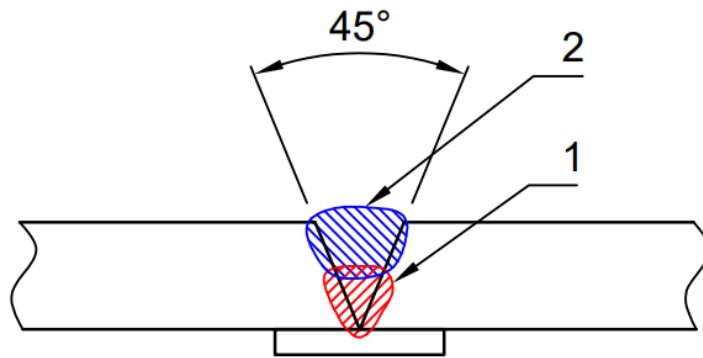
A quantidade de filetes realizados foi definida a partir também da observação da maioria de filetes exigidos em processo. As quantidades e sequência de filetes também são evidenciados nas Figuras 15 e 16. Para o CP de topo, apresentado na Figura 16, foi utilizada uma chapa inferior denominada mata-junta com o intuito de se observar a penetração do filete de solda e também impedir que o Corpo de Prova seja soldado na superfície de apoio.

Figura 15 – Ilustração da secção da região de solda do corpo de Prova de solda filete. A) lado “A”: solda cordão único, composta pelo passe de cordão 1; B) lado “B”: solda multipasses, composta pelos passes de cordão 2, 3 e 4.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

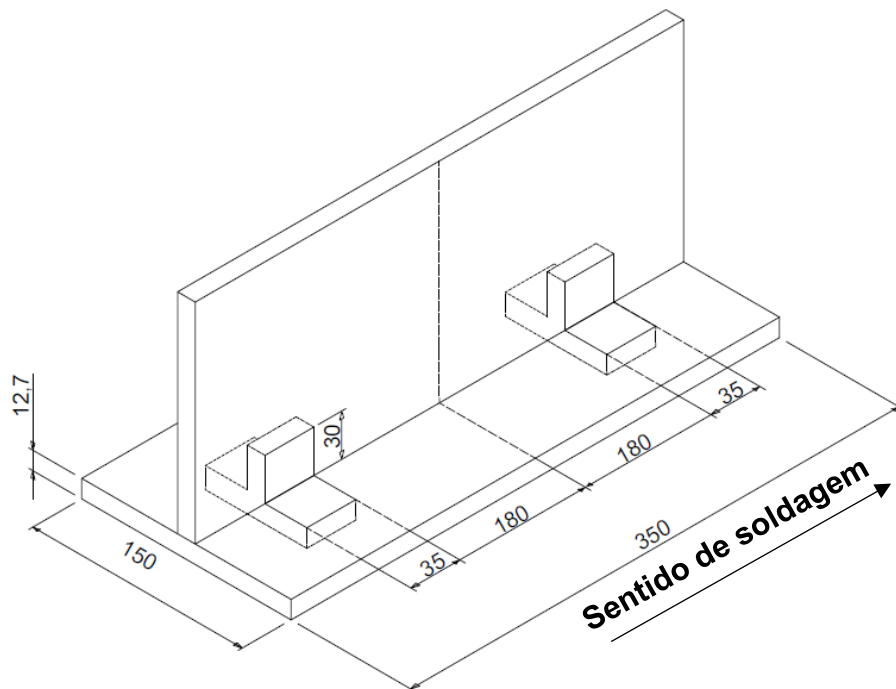
Figura 16 – Ilustração da secção da região de solda do corpo de Prova de solda de Topo, composta pelos passes de cordão 1 e 2.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

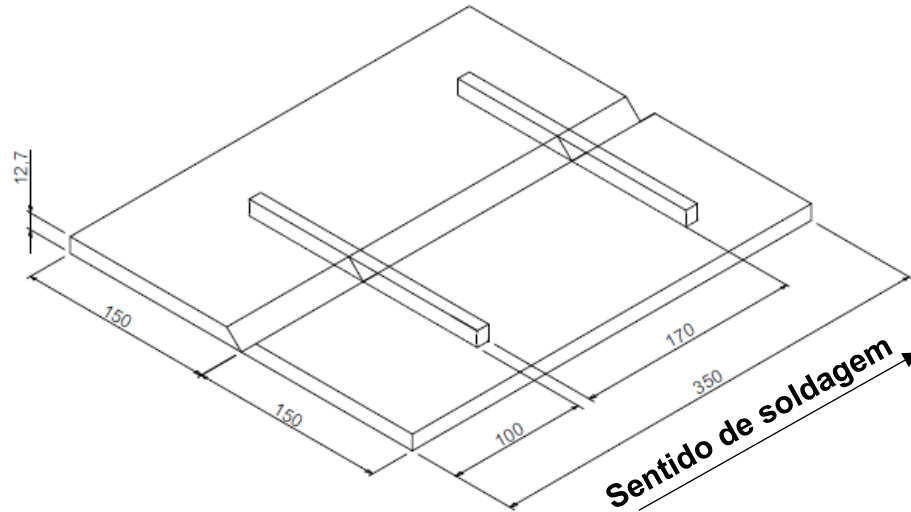
Em todos os recortes dos corpos de prova para extração serão destinados ao ensaio de macrografia. As Figuras 17 e 18 evidenciam o posicionamento da extração dos corpos de prova para os ensaios da solda de filete e solda de topo respectivamente.

Figura 17 – Posicionamento para extração dos corpos de prova da solda de filete.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Figura 18 – Posicionamento para extração dos corpos de prova da solda de topo



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Para melhor identificação dos corpos de prova e apresentação dos resultados, todos os recortes foram nomeados de acordo com o ensaio realizado, a geometria do cordão de solda e o gás utilizado no processo. A Tabela 3 apresenta as divisões e nomenclatura dos CP's. A nomeação dos CP's obedeceu a sequência de soldagem, ou seja, do início para final do cordão, nas Figuras 17 e 18, os CP's serão nomeados conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 3 – Nomenclaturas dos corpos de prova para ensaio de macrografia.

Mistura	Cordão	CP	Macrografia
SG-ACO 8/2	Filete	MF1	MF1A
			MF1B
		MF2	MF2A
			MF2B
SG-AC 10	Filete	MF3	MF3A
			MF3B
		MF4	MF4A
			MF4B
SG-AC 18	Filete	MF5	MF5A
			MF5B
		MF6	MF6A
			MF6B
SG-ACO 8/2	Topo	MT1	MT1
		MT2	MT2
SG-AC 10	Topo	MT3	MT3
		MT4	MT4
SG-AC 18	Topo	MT5	MT5
		MT6	MT6

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

3.4 Macrografia

Um dos principais ensaios visuais utilizados para juntas nos processos de soldagem, a Macrografia foi escolhida neste trabalho para que se pudesse avaliar a geometria e condições visuais dos cordões realizados.

Nos ensaios realizados neste estudo o auxílio óptico utilizado foi um microscópio Olympus Stream Basic modelo SZ61 com lente de aumento de 6,7x, apresentado na Figura 19, já para o ataque químico à superfície polida para revelação da região soldada, o CP foi mergulhado por 40 segundos em solução de ácido clorídrico 50% aquecido a 80°C.

Figura 19 – Microscópio Olympus Stream Basic modelo SZ61



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Para os CP's extraídos das soldas filete e topo será realizado o ensaio de Macrografia. Em ambos os tipos de cordões serão analisadas as dimensões dos cordões de solda além do impacto que tiveram no metal de base, como penetração e ZTA. A literatura de Modenesi (2001) será a principal referência para análise de descontinuidades das secções definidas no tópico 3.2.

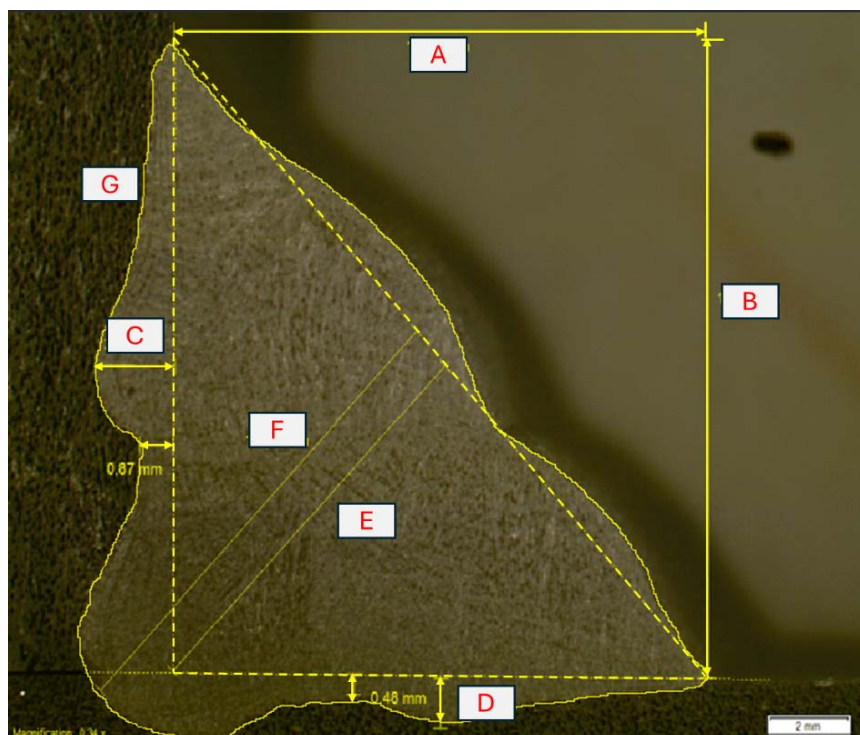
Para extração das dimensões das secções observadas foi utilizado o Software Image J, os resultados obtidos foram preenchidos em tabelas para permitir melhor comparação.

3.5 Morfologia do cordão

Se tratando de um processo de fabricação bem definido, a soldagem apresenta resultados bem dominados e já esperados de acordo com a padronização de parâmetros pré definidos no processo. Um dos resultados que mais importam na soldagem e que garantem as propriedades mecânicas da estrutura é a geometria do cordão e o impacto gerado nos metais de base, o estudo dessa geometria é chamado morfologia da soldagem.

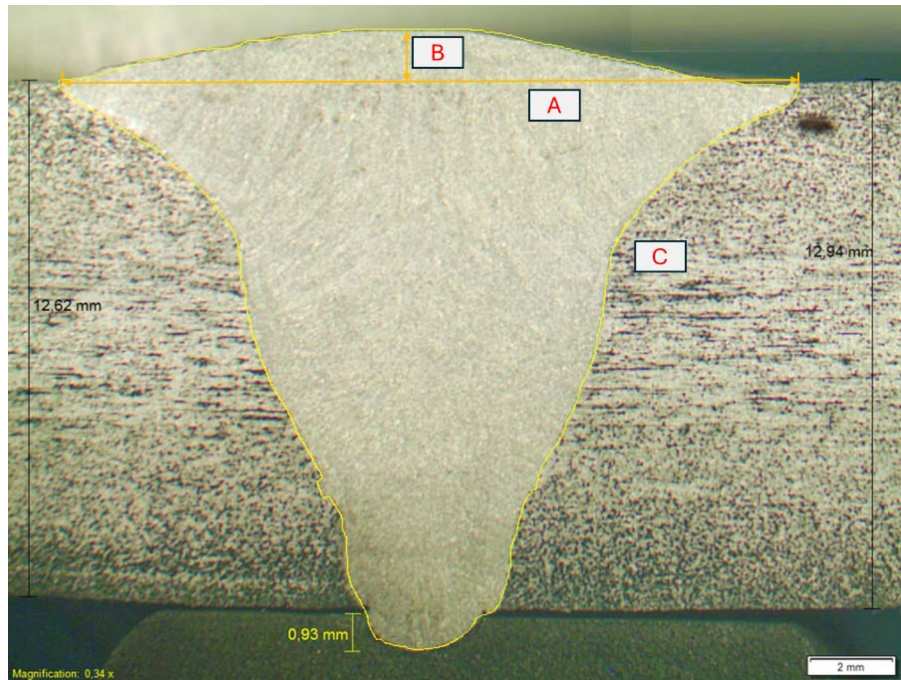
Para tanto, são feitas algumas definições na geometria dos cordões que são comumente utilizadas para interpretar a qualidade da solda. Essas definições podem variar de acordo com o tipo de junta. As Figura 20 e 21 ilustram as nomenclaturas dadas as dimensões da solda que podem ser observadas através do ensaio de macrografia. Além das dimensões indicadas nas Figura 20 e 21 serão extraídas também com auxílio do software Image J as áreas dos cordões.

Figura 20 – Perfis adequados de solda filete multipasses. As medidas indicadas representam respectivamente A) Perna horizontal; B) Perna vertical; C) Penetração horizontal mínima e máxima; D) Penetração vertical mínima e máxima; E) Garganta teórica; F) Garganta efetiva; G) Contorno da área do cordão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Figura 21 – Perfis adequados de solda de topo. As medidas indicadas representam respectivamente A) Largura do cordão; B) Altura do reforço do cordão; C) contorno da área do cordão



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

3.6 Parâmetros de soldagem

Para manter uma base passível de comparação todos os corpos de prova de juntas iguais foram soldados com os mesmos parâmetros variando somente a composição da mistura dos gases de proteção. Os parâmetros utilizados foram selecionados de uma EPS já existente no processo e qualificada para a mistura ternária e são apresentados na Tabela 3.

Também com o objetivo de manter o padrão e não aumentar as variáveis, todos os cordões foram realizados utilizando o arame ER70S-6 que possui características químicas e mecânicas semelhantes ao metal de base.

Tabela 4 – Parâmetros de soldagem para cada CP.

Tipo de Junta	Filete				Topo	
	1	2	3	4	1	2
PASSE						
Tensão (V)	28,8	26,2	25,9	26	29,4	29,4
Corrente (A)	246	243	243	245	274	271
Oscilação (mm)	2	1,8	2,5	2	2	3,5
Frequência de Pulso (Hz)	220	200	200	200	260	250
Velocidade de Arame (m/min)	10	10	10	10	10	11
Velocidade de solda (cm/min)	28	30	30	30	30	20
Tensão de pico (V)	38	37	37	37	27,5	37
Tempo de pulso (ms)	2	2	2	2	2	2,1
Frequência de Oscilação (Hz)	2,78	3,12	3,12	3,12	3,12	1,47
Corrente de fundo (A)	85	75	75	75	85	85
Vazão (L/min)	15 - 16	15 - 16	15 - 16	15 - 16	15 - 16	15 - 16

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

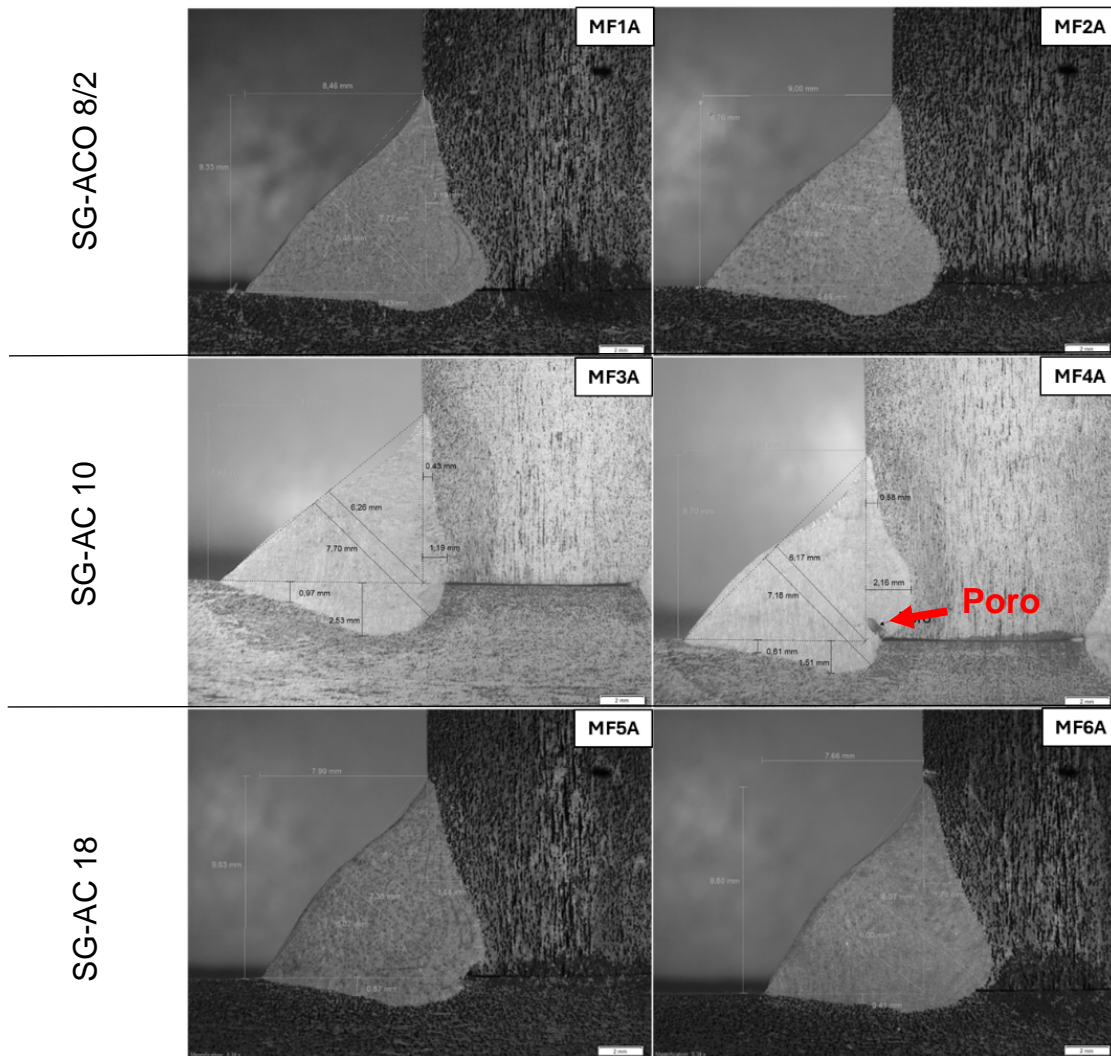
Neste tópico são apresentados todos os resultados obtidos nos corpos de prova, desde as imagens dos aspectos visuais após o processo de soldagem até os dados médios obtidos através da observação da morfologia da junta. Como o objetivo deste trabalho é avaliar a influência de diferentes misturas de gases de proteção na junta soldada, os resultados serão dispostos de forma a comparar as juntas soldadas a fim de obter uma conclusão relacionada a possibilidade de utilização de cada uma das misturas no processo de soldagem.

4.1 Macrografia solda filete passe simples

A Figura 22 apresenta as macrografias dos cordões de solda filete de passe único. É ideal neste ensaio que se observe a maior penetração possível, sem apresentar poros, trincas ou falta de fusão, as dimensões extraídas das macrografias estão apresentadas na Tabela 4. A geometria do cordão também será comparada a fim de concluir quais cordões apresentam boa geometria de cordão e reforço ideal.

Foi observado nos cordões uma boa geometria de pernas de tamanhos aproximados de 8mm. Ambas as imagens do cordão em que foi utilizado, o gás SG-AC 10 apresentou boa penetração se destacando em relação aos demais.

Figura 22 – Macrografias dos cordões de solda fileta passe único.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

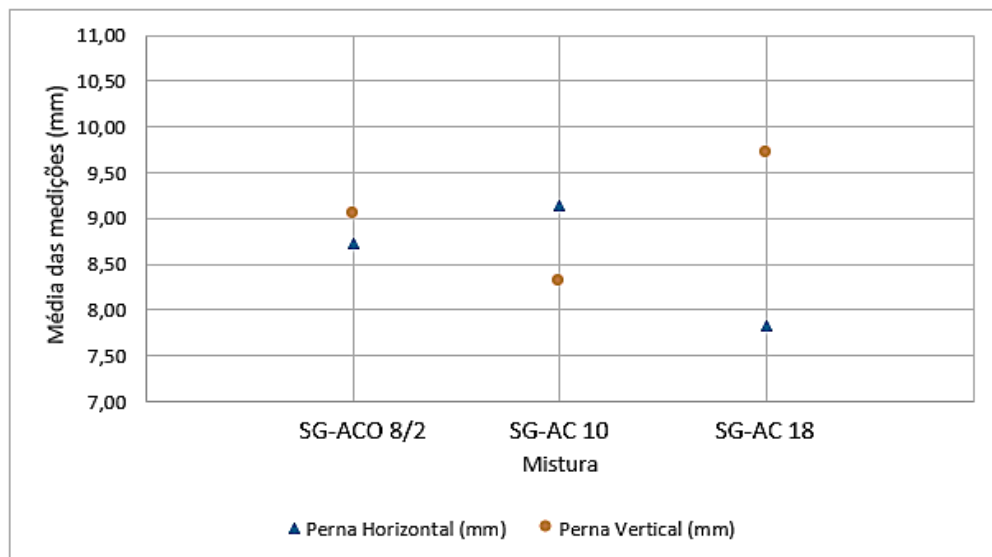
Tabela 5 – Dimensões dos cordões de solda fileta passe único.

FILETE ÚNICO PASSE	SG-ACO 8/2		SG-AC 10		SG-AC 18	
	MF1A	MF2A	MF3A	MF4A	MF5A	MF6A
Perna Horizontal (mm)	8,46	9	9,67	8,61	7,99	7,66
Perna Vertical (mm)	9,33	8,76	7,92	8,70	9,63	9,8
Penetração Horizontal (mm)	1,19	0,84	1,19	1,51	1,58	1,73
Penetração Vertical (mm)	0,43	0,65	2,53	2,16	0,87	0,41
Garganta Teórica (mm)	6,45	6,19	6,26	6,17	6,07	6
Garganta Efetiva (mm)	7,72	7,74	7,70	7,18	7,38	8,07
Área do cordão (mm ²)	72,96	66,61	57,98	55,93	63,28	62,46

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Com o propósito de melhor interpretar as medidas apresentadas e compreender os resultados obtidos em cada cordão as médias obtidas para cada mistura estão apresentadas nos Gráficos 1, 2, 3 e 4.

Gráfico 1 – Dimensão média das pernas dos cordões de passe único.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

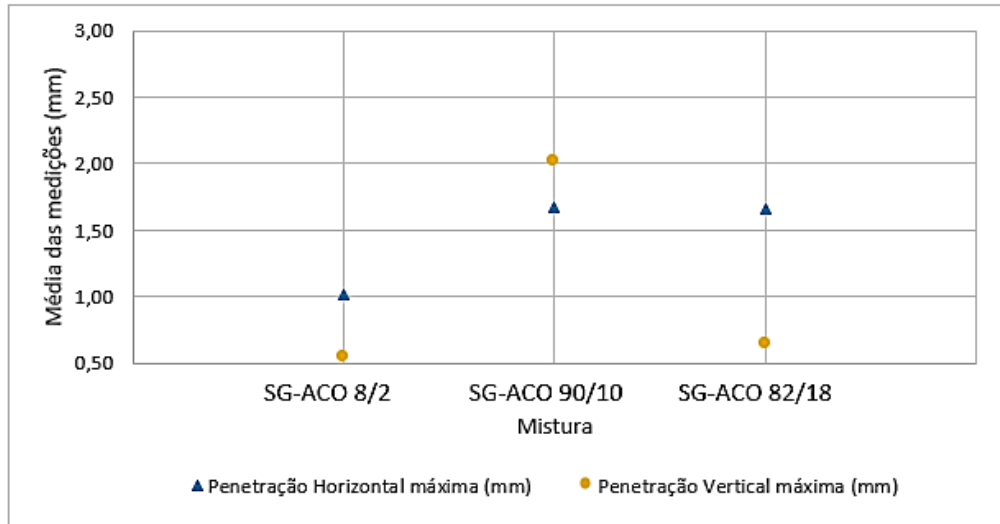
O Gráfico 1 apresentou uma pequena variação das medidas do gás SG-AC 10 em comparação com a primeira mistura, já na mistura SG-AC 18, a variação se tornou mais evidente. sendo positiva para perna vertical mas negativa para a perna horizontal. Ambas as misturas indicam distanciamento das dimensões das pernas verticais e horizontais quando aumentado a proporção de CO₂.

Conforme apontado por Marques, Modenesi e Bracarense (2011), é característico deste gás o aumento da temperatura do arco elétrico, tal particularidade pode ocasionar em maior molhabilidade da poça de fusão e, conseqüentemente, na molhabilidade do metal fundido gerando maior perna horizontal nos corpos de prova com maior concentração como encontrado na mistura SG-AC 10. Entretanto o Gráfico também apresenta uma inversão da proporção da perna da mistura SG-AC 18, essa incompatibilidade pode ser relacionada com alguma variação da posição da tocha no momento da soldagem dos cordões.

No Gráfico 2 a mistura SG-AC 10 apresenta dimensões vantajosas de penetração vertical e horizontal quando comparadas as demais misturas indicando boa simetria das penetrações além de um valor absoluto próximo dos 2mm. As

misturas SG-ACO 8/2 e SG-AC 18 apresentaram medidas das penetrações verticais praticamente nulas.

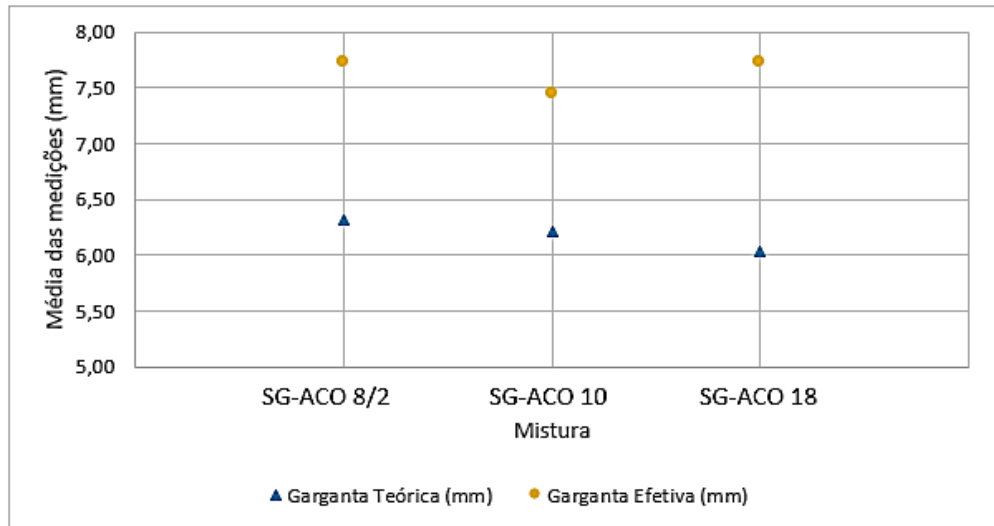
Gráfico 2 – Dimensão média das penetrações dos cordões de passe único.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

As dimensões apresentadas no Gráfico 3 indicam boas semelhanças entre as três misturas com boas medidas de gargantas efetivas. É observado ainda uma pequena diminuição no valor da garganta teórica que é esperado devido a maior diferença nas dimensões das pernas verticais e horizontais apresentadas no Gráfico 1, a diferença na geometria das pernas, que podem ser comparadas aos catetos de um triângulo, acarreta na diminuição da altura do triângulo medida da hipotenusa ao fundo da garganta teórica.

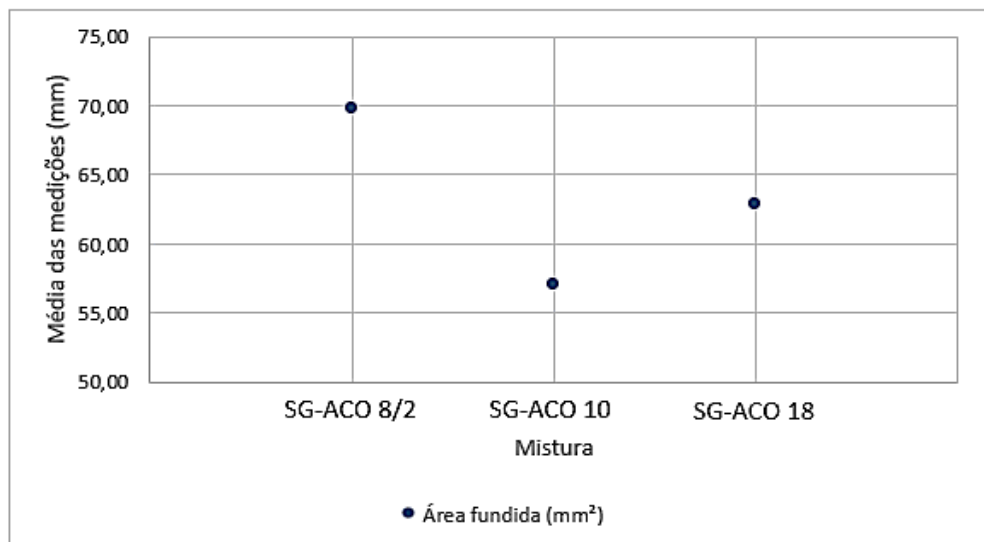
Gráfico 3 – Dimensão média das gargantas dos cordões de passe único



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Distante das medições apresentadas nos gráficos anteriores as áreas médias indicadas no Gráfico 4 não expõem uma concordância clara na variação impactadas pelas dimensões dos gráficos anteriores ou pela quantidade de CO₂ nas misturas, todavia há uma clara defasagem na medida da mistura SG-AC 10. Pode ser observado no cordão MF4A da Figura 18 uma falta de material na parte superior do cordão, além de um poro no fundo da garganta real que influencia no contorno da penetração da garganta. Ambas as condições impactam diretamente no valor da área da secção do cordão.

Gráfico 4 – Dimensão média da área fundida dos cordões de passe único.

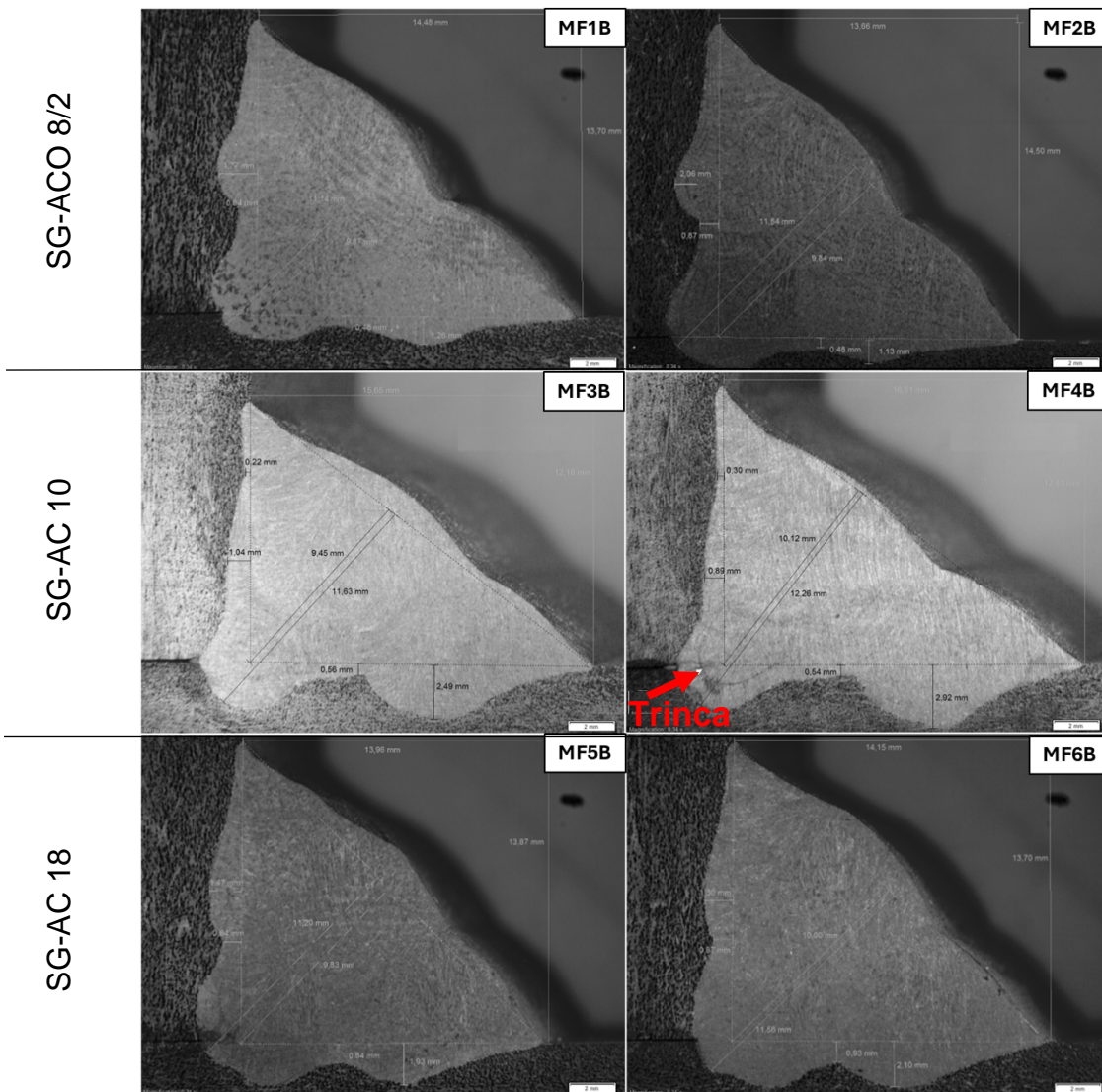


Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

4.2 Macrografia de solda filete multipasses

A Figura 23 apresenta as macrografias dos cordões de solda filete realizados com três passes, é notável nas imagens que ambas as misturas apresentaram características morfológicas semelhantes e formatos coerentes indicando os três passes. A imagem MF4B, que representa a segunda extração de Corpo de Prova da mistura SG-AC 10, apresentou uma trinca em formato de “U” contornando a garganta teórica do cordão apresentado.

Figura 23 – Macrografias dos cordões de solda filete multipasses.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Apesar da descontinuidade a mistura apresentou boas dimensões morfológicas como apontado na Tabela 5 abaixo. Nenhuma outra imagem apresentou descontinuidades ou variações graves na morfologia do cordão.

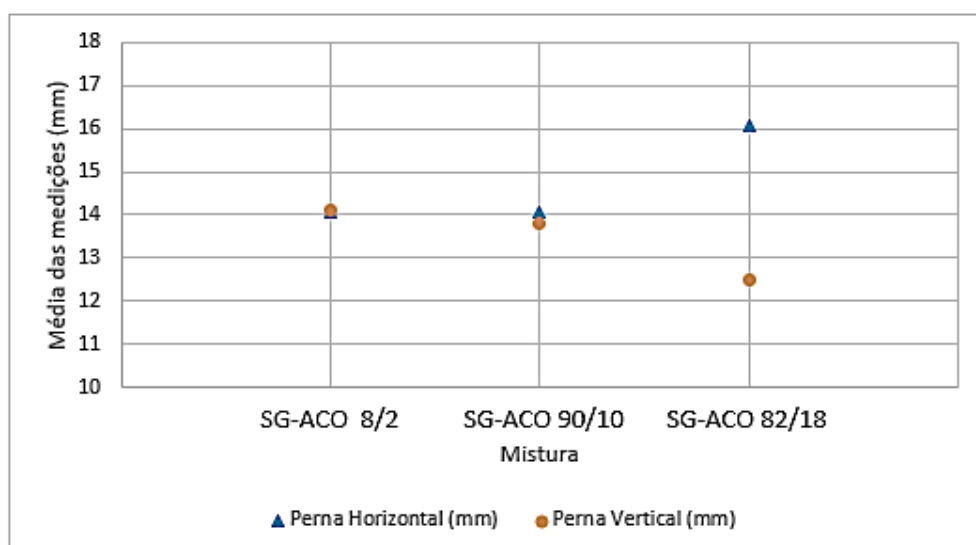
Tabela 6 – Dimensões dos cordões de solda filete multipasses.

FILETE MULTIPASSES	SG-ACO 8/2		SG-AC 10		SG-AC 18	
	MF1B	MF2B	MF3B	MF4B	MF5B	MF6B
Perna Horizontal (mm)	14,48	13,66	15,65	16,51	13,96	14,15
Perna Vertical (mm)	13,7	14,5	12,16	12,83	13,87	13,7
Penetração Horizontal máx. (mm)	1,77	2,06	2,49	2,92	1,47	1,30
Penetração Vertical máxima (mm)	1,26	1,13	1,04	0,89	1,93	2,10
Garganta Teórica (mm)	9,87	9,84	9,45	10,12	9,83	10
Garganta Efetiva (mm)	11,14	11,54	11,63	12,26	11,2	11,56
Área fundida (mm ²)	163,02	156,21	138,01	140,68	138,46	152,95

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

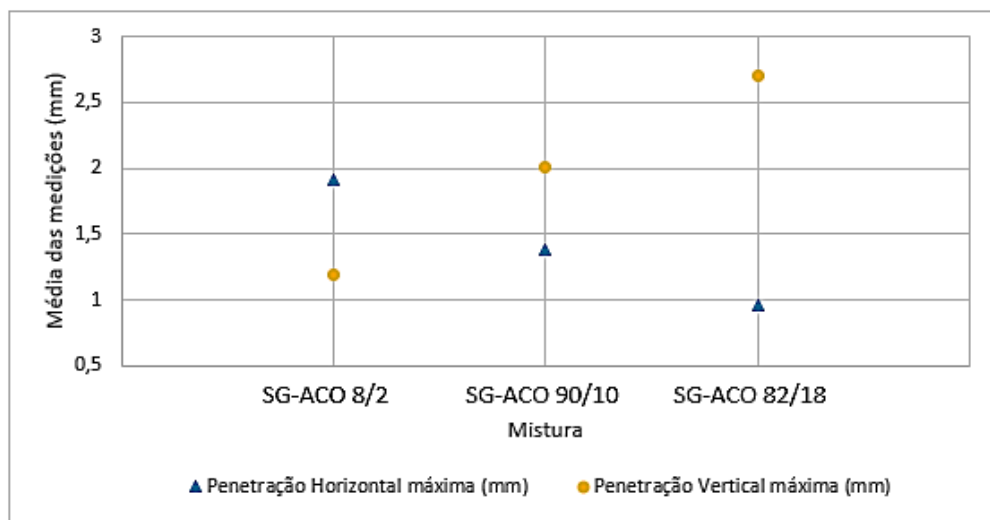
Assim como no cordão de filete simples o gás SG-AC 10 apresentou boa penetração em relação as outras misturas evidenciando sua efetividade submetido a este tipo de processo. Os gráficos 5, 6, 7 e 8 abaixo ilustram as dimensões apresentadas na Tabela 6 quando aumentado a proporção de CO₂ na mistura gasosa.

Gráfico 5 – Dimensão média das pernas dos cordões multipasse.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Gráfico 6 – Dimensão média das penetrações dos cordões multipasse.



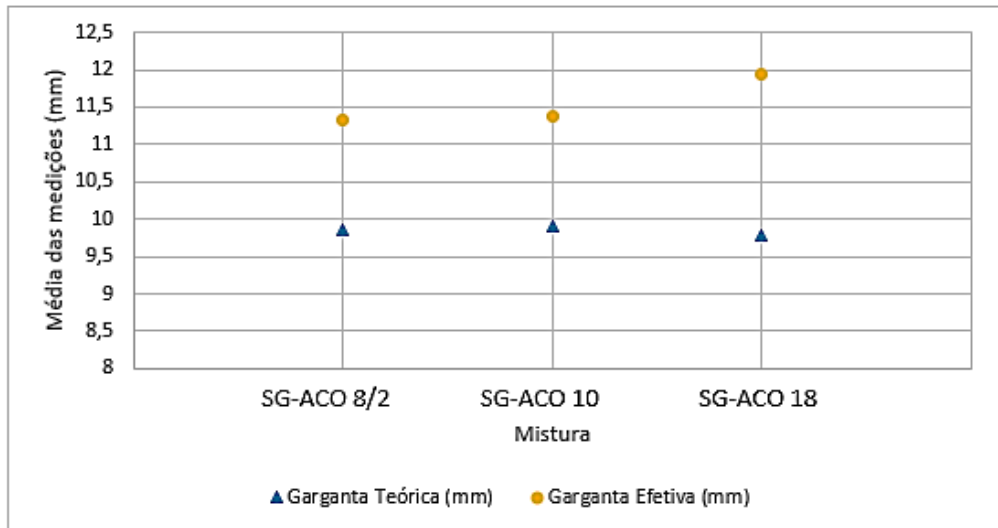
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

É observado que a mistura SG-AC 10 apresentou medidas intermediárias quando comparado aos demais gases. Nos Gráficos 5 e 6 ocorreram variações consideráveis quando comparadas as medidas verticais e horizontais, principalmente na mistura SG-AC 18. O Gráfico 5 indicou um crescimento no tamanho da perna horizontal enquanto ocorreu diminuição da perna vertical, quando aumentada a proporção de CO₂.

. A maior temperatura do arco pode também ter impactado na boa penetração vertical apresentada pelos gases com maior concentração de CO₂ no Gráfico 6.

O Gráfico 7 apresenta medidas semelhantes das dimensões das gargantas dos corpos de prova com leve crescimento da garganta efetiva proporcionalmente ao CO₂. De forma análoga as dimensões de perna e penetração apresentados nos Gráficos anteriores, o aumento da garganta pode estar relacionado ao aumento da temperatura do arco elétrico.

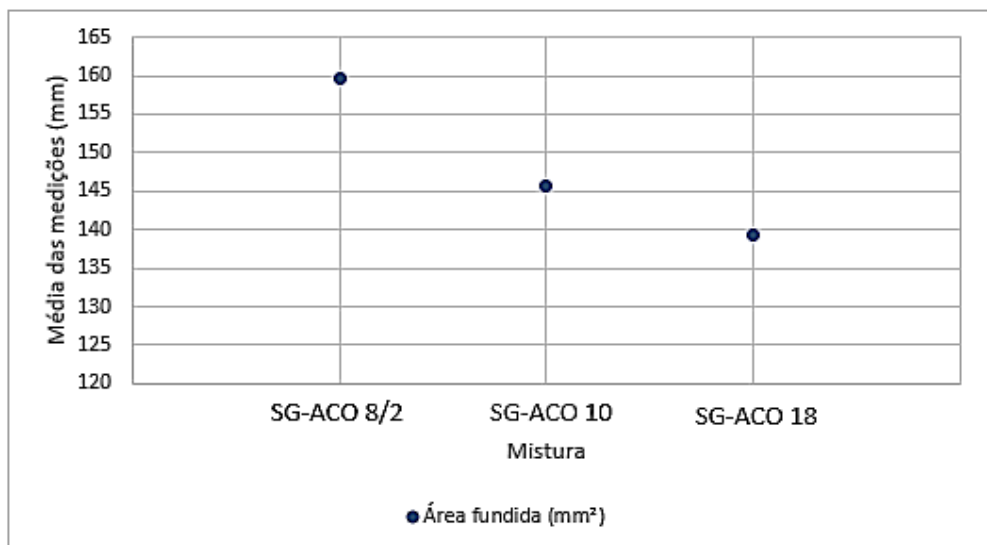
Gráfico 7 – Dimensão média das gargantas dos cordões multipasse.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

As dimensões das áreas fundidas geralmente estão relacionadas com as demais dimensões apresentadas nos gráficos anteriores. No Gráfico 8 as medidas das áreas apresentadas são menores nas misturas as quais as diferenças nas dimensões das pernas foram mais evidentes.

Gráfico 8 – Dimensão média das áreas fundidas dos cordões multipasse

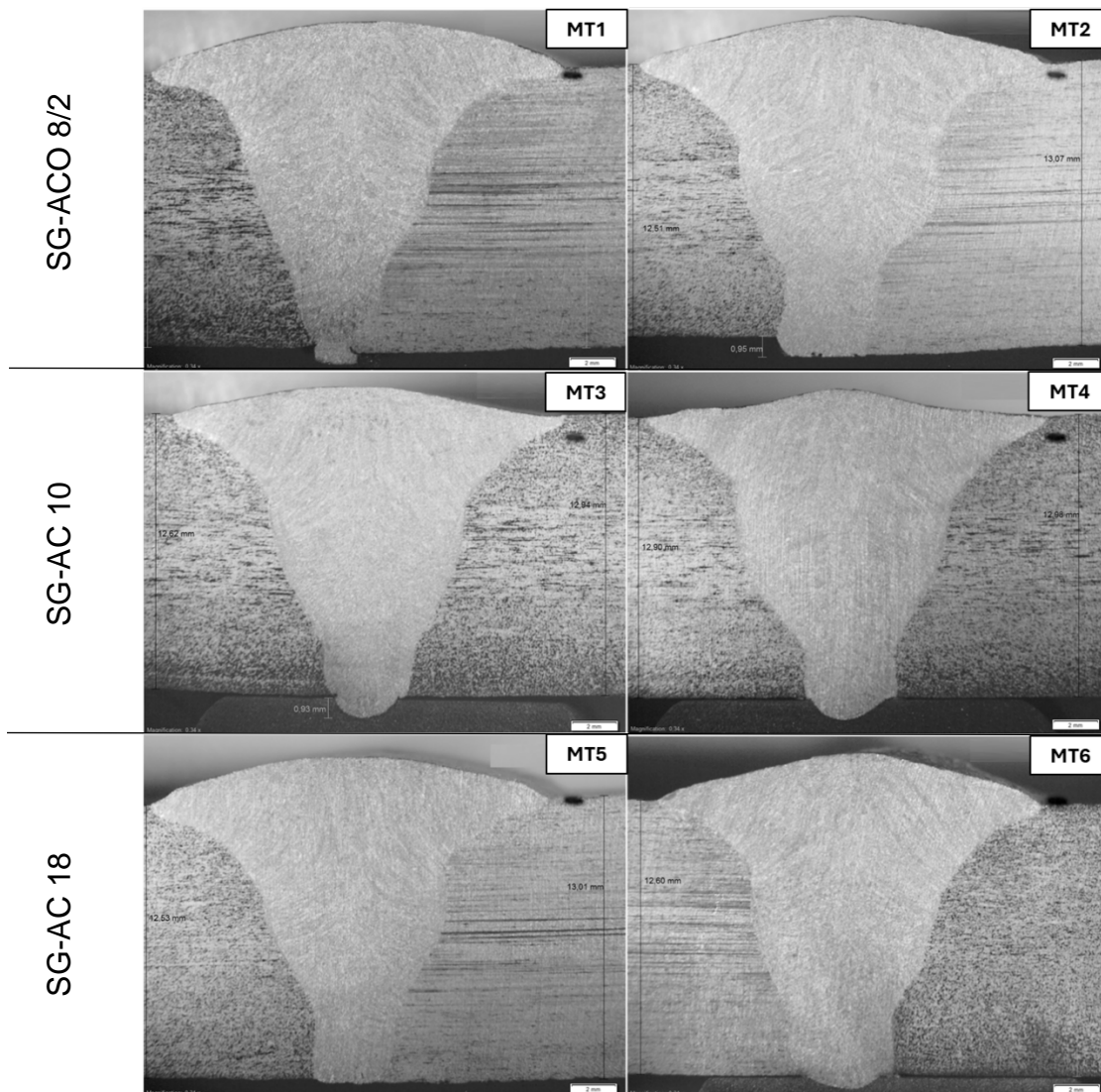


Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

4.3 Macrografia de solda de topo

As macrografias dos cordões da junta de topo estão apresentadas na Figura 24, todas as imagens apresentaram morfologias satisfatórias manifestando que os parâmetros utilizados resultaram em bons cordões de solda. Nenhum cordão apresentou defeitos ou descontinuidades como poros ou trincas, todavia alguns mata juntas se desprenderam no momento do corte e preparação dos corpos de prova. Apenas a mistura SG-AC 10 foi capaz de gerar uma penetração boa o bastante em que o mata junta não se soltou em ambos os CP's.

Figura 24 – Macrografias dos cordões de solda filete multipasses.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Apesar dos bons resultados visuais algumas diferenças dimensionais podem ser consideradas, a Tabela 6 exibe as medidas obtidas de cada imagem. Devido à ausência de mata juntas em alguns corpos de prova não foram medidas as penetrações dos cordões.

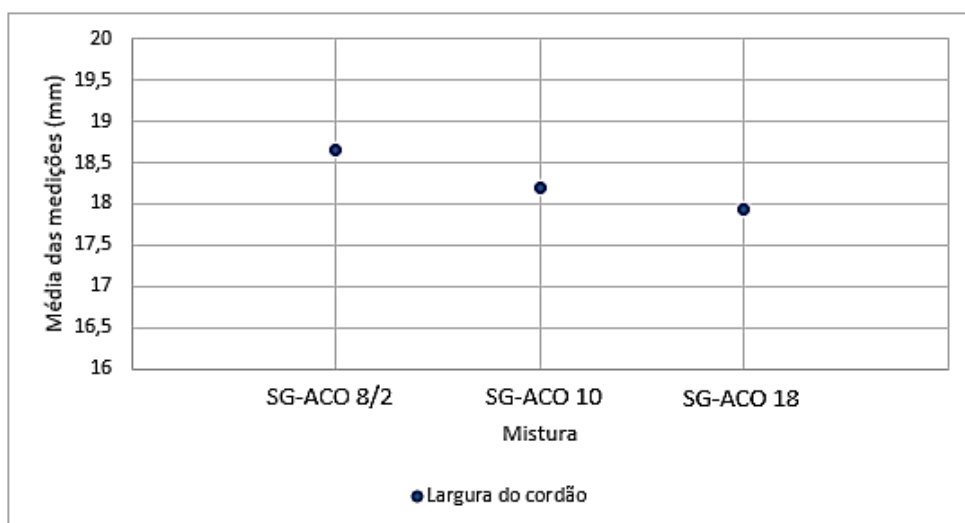
Tabela 7 – Dimensões médias dos cordões de solda de topo.

TOPO	90/8/2		90/10		82/18	
	MT1	MT2	MT3	MT4	MT5	MT6
Largura do cordão (mm)	18,92	18,38	18,03	18,35	18,18	17,69
Altura do reforço (mm)	2,28	2,15	1,28	1,29	2,05	2,27
Área fundida (mm)	126,48	133,98	123,61	127,83	124,45	129,52

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

As larguras dos cordões apresentaram boas dimensões em ambas as misturas como observado no Gráfico 9 conquanto, há uma variação máxima de 4% da menor para a maior medida, não indicando grande impacto da dissemelhança das proporções das misturas gasosas.

Gráfico 9 – Dimensão média das larguras dos cordões das juntas de topo.

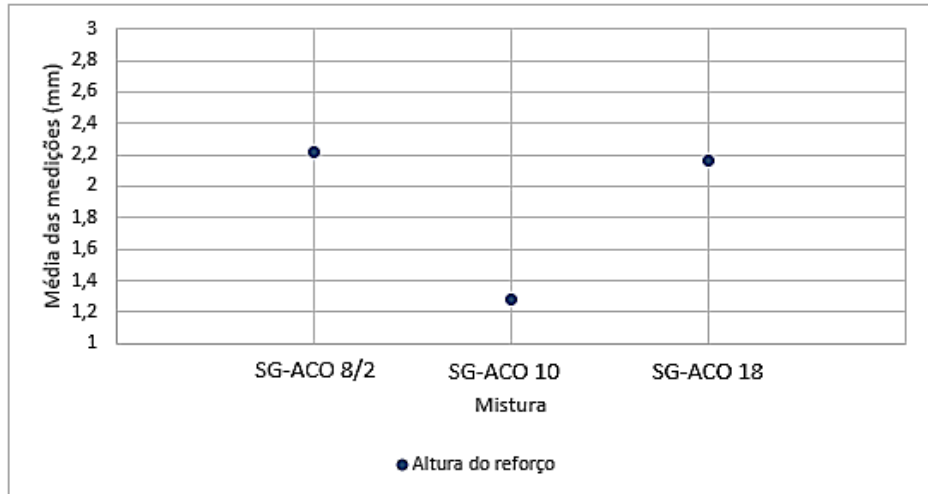


Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Diferente da tendência anterior, o Gráfico 10 apresenta uma inconstância nas medidas com um destaque negativo da altura do cordão da mistura SG-AC 10.

Nas imagens MT3 e MT4 da Figura 21 é possível notar que próximo as laterais dos reforços do cordão há menos material quando comparado as demais misturas deixando o perfil do cordão menos arredondado e mais pontiagudo nas laterais.

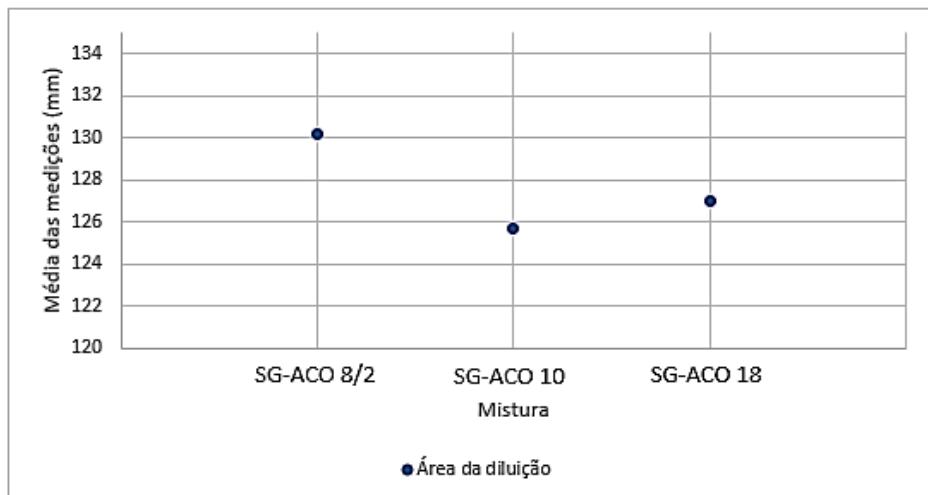
Gráfico 10 – Dimensão média das alturas dos reforços dos cordões das juntas de topo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Em virtude dos perfis dos reforços dos cordões, conforme apresentado anteriormente, o Gráfico 11 apresenta uma estrutura semelhante à do Gráfico 10, influenciando que as áreas das secções dos cordões foram diretamente impactadas pelo formato dos reforços de cada imagem apresentada na Figura 21.

Gráfico 11 – Dimensão média das áreas fundidas dos cordões das juntas de topo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo evidenciaram que as diferentes misturas de gases de proteção utilizadas no processo GMAW impactaram diretamente na morfologia dos cordões de solda, nas dimensões das juntas soldadas e nas características visuais e estruturais.

As análises das macrografias demonstraram que a mistura SG-AC 10 apresentou o melhor equilíbrio entre penetração, profundidade das gargantas e dimensões das pernas, destacando-se como a mais eficaz para os parâmetros avaliados, mas apresentou limitações devido ao aumento da possibilidade de defeitos, como trincas e porosidade. Já a mistura SG-AC 18, com maior concentração de CO₂, mostrou vantagens em termos de custo, porém apresentou mais inconsistências nas dimensões com destaques hora, positivos, hora negativos. Por outro lado, a mistura SG-ACO 8/2 proporcionou resultados consistentes, mas sem se sobressair nas variáveis analisadas.

Os gráficos comparativos reforçaram que a geometria e as dimensões dos cordões de solda variam conforme a proporção de CO₂, influenciando diretamente a qualidade final da solda e os custos do processo. Assim, conclui-se que a escolha da mistura gasosa deve levar em consideração tanto os aspectos técnicos quanto os econômicos, adaptando-se às necessidades específicas do processo produtivo.

Como limitações, destaca-se a análise realizada em um único tipo de material de base e geometrias de junta específicas. Para trabalhos futuros, recomenda-se expandir a avaliação para diferentes geometrias e misturas gasosas, além de explorar a influência de outros parâmetros operacionais na qualidade e no custo da soldagem.

6 REFERÊNCIAS

Almeida, D. T., Piovesan, A. S., Souza, J. H., & Kuntz, M. R. INFLUÊNCIA DO GÁS DE PROTEÇÃO SOBRE A QUANTIDADE DE ESCÓRIA DE SOLDA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE JUNTAS DE AÇO CARBONO SOLDADAS PELO PROCESSO MAG. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, São Paulo, setembro, 2018, p. 7.

COLPAERT, Hubertus. Metalografia dos Produtos Siderurgicos Comuns. 4ª edição. São Paulo: Edgard Blucher, 2008, p. 38.

COSTA, Ubirajara. Tudo o que você precisa saber sobre o processo de soldagem MIG/MAG. SUMIG, 2018. Disponível em: [<https://www.sumig.com/pt/blog/post/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-processo-de-soldagem-mig-mag>]. Acesso em 25 de janeiro de 2025.

ESAB. Soldagem MIG/MAG. ESAB, 2005.

FELIZARDO, Ivanilza. Tecnologia da Soldagem. DEM - CEFET-MG, 2016.

FISCHER, A.. Estudo da Influência dos Parâmetros de Soldagem GMAW - Arco Pulsado. 2011. 170p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011, p 162.

GEARY, Don; Miller, Rex. Soldagem. Bookman, 2013.

MACHADO, Ivan. Soldagens e técnicas convexas: processos. Porto Alegre: Editado pelo Autor, 1996.

MARQUES, Paulo; MODENESI, Paulo; BRACARENSE, Alexandre. Soldagem, Fundamentos e Tecnologia. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

Matsuda, F., Ushio, M., & Tanaka, Y. (agosto de 1983). Metal Transfer Characteristics in Pulsed GMA Welding (Welding Physics, Process & Instrument). p. 17.

MODENESI, Paulo. Soldagem I - Descontinuidades e Inspeção em juntas Soldadas. Belo Horizonte. UFMG, 2001. 16 p.

MODENESI, Paulo; MARQUES, Paulo; SANTOS, Dagoberto. Introdução a Metalurgia da Soldagem. UFMG, 2012.

MOREIRA, Alcindo Fernando. Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido através dos processos de soldagem GMAW e FCAW. 2008. 146 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2008.

PÉPE, N. V. da C. Advances in Gas Metal Arc Welding and Application to Corrosion Resistant Alloy Pipes. 2010. 546p. Tese (PhD) - Cranfield University, Wiltshire, 2010. p 29.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio; MELLO, Fábio. Soldagem: Processos e Metalurgia. Edgar Blücher, 1992