



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E COMPUTAÇÃO

BERLIM SUHET PASSOS

Efeito do Potencial de Oxidação na Molhabilidade de Cordões de Solda

GOIÂNIA
2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): Berlim Suhet Passos

Título do trabalho: Efeito do Potencial de Oxidação na Molhabilidade de Cordões de Solda

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [x] SIM [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Souza, Professor do Magistério Superior**, em 02/07/2026, às 15:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Berlim Suhet Passos**, **Usuário Externo**, em 02/07/2026, às 15:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6298828** e o código CRC **83630A14**.

Referência: Processo nº 23070.013391/2026-41

SEI nº 6298828

BERLIM SUHET PASSOS

Efeito do Potencial de Oxidação na Molhabilidade de Cordões de Solda

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação, da Universidade Federal de Goiás, como requisito para obtenção do bacharelado em Engenharia Mecânica.

Orientador: Daniel Souza

Goiânia

2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Passos, Berlim Suhel

Efeito do Potencial de Oxidação na Molhabilidade de Cordões de Solda [manuscrito] / Berlim Suhel Passos. - 2026.

XLIII, 43 f.:

Orientador: Prof. Dr. Daniel Souza

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Engenharia Mecânica, Goiânia, 2026.

1. Molhabilidade. 2. Potencial de Oxidação. 3. Soldagem Mig/mag. 4. Gás de Proteção.

I. Souza, Daniel, orient. II. Título.

CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos trinta dias do mês de junho do ano de dois e vinte e seis iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “Efeito do Potencial de Oxidação na Molhabilidade de Cordões de Solda”, de autoria de Berlim Suhett Passos, do curso de Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo Prof. Daniel Souza (EMC/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Prof. Demostenes Ferreira Filho (EMC/UFG), Eng. João Gabriel Nunes Rodrigues (UFG). Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 8,2, tendo sido o TCC considerado aprovado.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Souza, Professor do Magistério Superior**, em 30/06/2026, às 10:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Demostenes Ferreira Filho, Professor do Magistério Superior**, em 30/06/2026, às 10:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Gabriel Nunes Rodrigues, Discente**, em 30/06/2026, às 10:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6298822** e o código CRC **4E3560A0**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais por sempre me apoiarem e fornecerem as melhores condições para trilhar meu caminho. Agradeço a minha namorada por estar sempre ao meu lado nos momentos mais difíceis, por sempre rir e chorar junto comigo e ser meu porto seguro em todos os momentos. Agradeço também a todos os amigos que esse curso me proporcionou, essa jornada não teria sido a mesma sem eles.

Estendo minha gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Daniel Souza, por todos os ensinamentos e parceria nesse projeto, bem como aos demais professores e técnicos da UFG

RESUMO

A molhabilidade do cordão de solda é um fator governante para a integridade estrutural e o acabamento geométrico em uniões soldadas, sendo fortemente influenciada pelas propriedades térmicas e químicas da atmosfera de proteção. Este trabalho teve como objetivo avaliar de forma quantitativa o impacto de diferentes composições de gases de proteção na geometria e no espalhamento de cordões de solda depositados pelo processo MIG/MAG automatizado. A metodologia experimental consistiu na execução de cordões, mantendo constantes os parâmetros operacionais de entrada. Foram testados seis grupos experimentais sob atmosferas distintas, incluindo gases puros de referência (100% Ar e 100% CO₂), misturas binárias com teores crescentes de dióxido de carbono (8%, 15% e 20%) e uma mistura contendo oxigênio (Ar + 2%O₂), o material de adição utilizado foi o eletrodo AWS ER70S-6 com 1 mm de diâmetro. Após a soldagem, as amostras foram seccionadas transversalmente com uma cortadora metalográfica, gerando um total de 54 corpos de prova. As imagens resultantes foram tratadas e analisadas no software ImageJ, no qual se realizou a medição do ângulo de contato nas margens do cordão. Os dados foram tabulados para o cálculo da média aritmética e do desvio padrão amostral. Os resultados demonstraram que a introdução controlada de CO₂ atuou de forma tensoativa na poça de fusão, reduzindo progressivamente o ângulo de contato em 12% e incrementando a molhabilidade, e a presença de O₂ não indicou nenhum tipo de alteração na molhabilidade, provavelmente pelo baixo percentual na mistura. Conclui-se que a presença de CO₂ em juntas soldadas atua para aumentar a molhabilidade do cordão de solda, a variação da porcentagem de dióxido de carbono na mistura com argônio não indicou alterações significativas, bem como a presença de oxigênio na atmosfera.

Palavras-chave: molhabilidade; potencial de oxidação; soldagem mig/mag; gás de proteção

ABSTRACT

Weld bead wettability is a governing factor for structural integrity and geometric finish in welded joints, being heavily influenced by the thermal and chemical properties of the shielding gas atmosphere. This work aimed to quantitatively evaluate the impact of different shielding gas compositions on the geometry and spreading of weld beads deposited by the automated GMAW process. The experimental methodology consisted of executing weld beads while maintaining constant input operational parameters. Six experimental groups were tested under distinct atmospheres, including pure reference gases (100% Ar and 100% CO₂) binary mixtures with increasing carbon dioxide contents (8%, 15%, and 20%), and a mixture containing oxygen (Ar + 2%O₂). The filler metal used was an AWS ER70S-6 electrode with a 1 mm diameter. After welding, the samples were cross-sectioned using a metallographic cutter, generating a total of 54 specimens. The resulting images were processed and analyzed using ImageJ software, in which the contact angle at the bead toes was measured. The data were tabulated to calculate the arithmetic mean and the sample standard deviation. The results demonstrated that the controlled introduction of CO₂ acted as a surfactant in the weld pool, progressively reducing the contact angle in 12% and increasing wettability, whereas the presence of O₂ did not indicate any change in wettability, likely due to its low percentage in the mixture. It is concluded that the presence of CO₂ in welded joints acts to increase weld bead wettability, and neither the variation of the carbon dioxide percentage in the mixture with argon nor the presence of oxygen in the atmosphere indicated significant changes.

Keywords: wettability; oxidation potential; MIG/MAG welding; shielding gas

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação soldagem MIG/MAG	8
Figura 2 – Ilustração da relação ângulo de contato e molhabilidade.....	9
Figura 3 – Representação esquemática da emissão por campo.....	12
Figura 4 – Tensões atuantes na poça de fusão	14
Figura 5 – Modelo de Wenzel.....	17
Figura 6 – Modelo de Cassie e Baxter	18
Figura 7 – Modos de transferência metálica.....	20
Figura 8 – Representação das forças intermoleculares de um líquido	25
Figura 9 – Fatores que movimentam a poça de fusão	26
Figura 10 – Equipamentos utilizados para confecção das amostras	29
Figura 11 – Resultado dos cordões de solda	30
Figura 12 – Formato final do cordão após o corte	33
Figura 13 – Imagem das amostras para cada atmosfera testada	34
Figura 14 – Visão gráfica dos resultados obtidos	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades dos gases de proteção	18
Tabela 2 - Parâmetros de soldagem selecionados	25
Tabela 3 - Ângulos de contato para cada grupo estudado	28

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1 Potencial de Oxidação	11
2.2 Molhabilidade	13
2.3 Parâmetros de Soldagem	20
2.4 Gases de proteção	22
2.5 Energias superficiais	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 Materiais e Equipamentos	28
3.2 Atmosferas de Proteção (Gases)	29
3.3 Confeção das Amostras	30
3.4 Método de análise da molhabilidade	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5. CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS	39

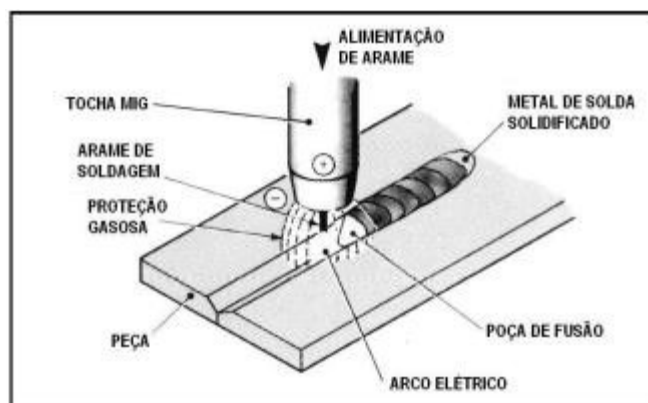
1. INTRODUÇÃO

No setor industrial, a soldagem consolida-se como um processo de fabricação fundamental, exercendo o papel crítico de promover a união permanente de componentes metálicos estruturais. A qualidade metalúrgica e a integridade geométrica da junta soldada constituem os critérios primordiais para assegurar que a união seja confiável, segura e desempenhe satisfatoriamente sua função em serviço.

Diante deste cenário, o processo de soldagem a arco elétrico com gás de proteção denominado MIG/MAG (Metal Inert Gas/ Metal Active Gas), destaca-se por sua elevada taxa de deposição, facilidade de automatização e versatilidade operacional (Scotti; Ponomarev, 2008). De acordo com Modenesi, Marques e Santos (2011) devido a tais características, o processo MIG/MAG é amplamente integrado a diversas cadeias produtivas globais, tornando essencial o controle rigoroso de suas variáveis para a garantia da qualidade do produto final. Essa técnica de deposição é governada por uma forte interdependência de parâmetros operacionais, tais como a intensidade de corrente, o comprimento do arco elétrico, a velocidade de alimentação do consumível e a composição da atmosfera protetiva.

Cada uma dessas variáveis altera diretamente a geometria do cordão de solda, influenciando a profundidade de penetração, a altura do reforço e a molhabilidade superficial sendo esta última o objeto central de investigação deste trabalho. A Figura 1 ilustra de forma esquemática os componentes essenciais e o arranjo operativo da soldagem MIG/MAG.

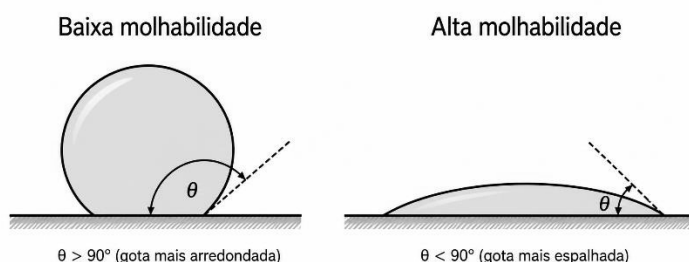
Figura 1 - Representação soldagem MIG/MAG



Fonte: Esab (2005)

No âmbito da metalurgia da soldagem, a molhabilidade descreve a aptidão do metal de adição em estado líquido de se estender uniformemente sobre o metal de base, preenchendo a junta e garantindo uma transição geométrica suave após a solidificação (Kubiak et al., 2011). Esse fenômeno dita diretamente a morfologia final do cordão no que tange à sua relação de convexidade, um fator mensurado quantitativamente através do ângulo de contato (θ), ilustrado pela Figura 2, estabelecido entre a margem do cordão e a superfície do substrato. Uma elevada convexidade é o reflexo de uma molhabilidade deficiente, cenário que pode propiciar o preenchimento incompleto da junta e induzir descontinuidades. Além disso, perfis excessivamente convexas comprometem o desempenho mecânico do componente, atuando como severos concentradores de tensão e reduzindo drasticamente a vida útil da peça sob carregamentos dinâmicos (Frear; Kinsman; Jones, 1991).

Figura 2 – Ilustração da relação entre ângulo de contato e molhabilidade



Fonte: Cunha et al. (2017)

A molhabilidade pode ser modulada por fatores como a rugosidade superficial, a compatibilidade metalúrgica entre os materiais e, primordialmente, pelo potencial de oxidação gerado pela atmosfera de proteção, aspecto que constitui o foco desta pesquisa.

O objetivo do presente trabalho consiste em investigar o impacto do potencial de oxidação da atmosfera de proteção sobre a molhabilidade do cordão de solda em aço carbono. Por meio da execução de cordões depositados sob diversas combinações de fluxos gasosos, busca-se aferir as variações no ângulo de contato interfacial, atestando a real influência das reações de oxidação na poça de fusão. A relevância prática desta investigação fundamenta-se na otimização econômica e operacional de processos fabris automatizados. Em termos financeiros, a substituição estratégica ou a redução do percentual de gases protetivos de alto custo, como

argônio por frações controladas de gases ativos mais acessíveis, como o CO₂ viabiliza uma redução direta nos custos de produção do cordão. Espera-se que a compreensão aprofundada desses mecanismos permita prever e controlar a formação geométrica de cordões de solda depositados sobre chapas, garantindo perfis de concordância suaves e livres de descontinuidades. Adicionalmente, o domínio sobre essas variáveis estende-se com igual relevância para cenários de operações de revestimento, nesses contextos uma baixa molhabilidade é crítica, pois pode impedir o espalhamento adequado do material de adição e gerar lacunas por falta de fusão interfacial ou entre cordões adjacentes, comprometendo severamente a integridade e a homogeneidade da camada protetora final.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Potencial de Oxidação

No campo da química o potencial de oxidação é definido como a tendência de um elemento em perder elétrons (Atkins; Paula, 2018). No âmbito da metalurgia da soldagem, o controle dessa variável é fundamental, visto que o potencial oxidante da atmosfera influencia diretamente a estabilidade do arco elétrico e a qualidade final do cordão de solda (Moura et al., 2018).

De acordo com Kou (2003), a adição de oxigênio (altamente oxidante) na atmosfera ionizada é um recurso estratégico, presente no modo de transferência por spray para a estabilização do arco, contudo, o autor ressalta que a elevada reatividade do meio pode induzir a formação de porosidades, incrementar a geração de fumos e promover a oxidação de elementos de liga, comprometendo as propriedades mecânicas do metal depositado. Sob a óptica da molhabilidade, o potencial de oxidação atua como um critério determinante. Segundo Scotti e Ponomarev (2008), existe uma correlação direta entre a reatividade do meio e a capacidade de espalhamento da poça de fusão: atmosferas com baixo potencial oxidante tendem a reduzir a molhabilidade em determinados materiais.

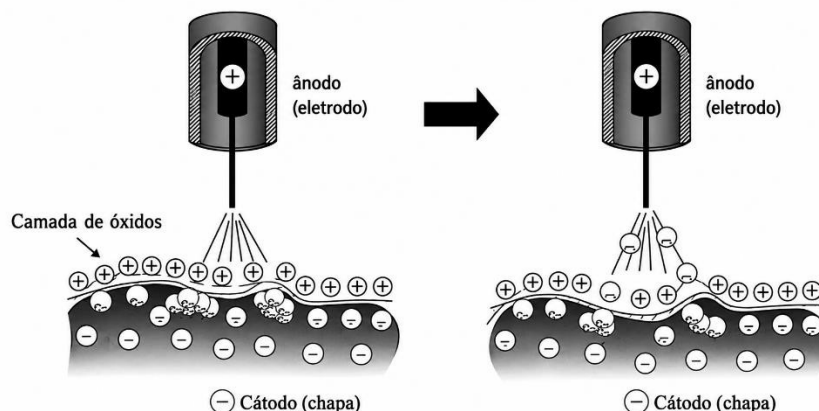
Os referidos autores também salientam que a presença de óxidos na superfície facilita os processos de ionização, favorecendo a abertura e a manutenção do arco. Com isso, a reatividade do metal de base deve orientar a seleção do gás de proteção, materiais com elevado potencial de oxidação exigem o uso de gases inertes para evitar reações excessivas com a atmosfera, ao passo que aços de menor reatividade podem demandar atmosferas ativas para assegurar a formação controlada de óxidos e a consequente estabilidade operativa.

Conforme mencionado anteriormente, a presença de elementos oxidantes na superfície do metal de base é fundamental, desde que em proporções controladas, pois auxilia significativamente na ignição e estabilização do arco voltaico. O arco elétrico é estabelecido por meio do fluxo de elétrons da região do cátodo para o ânodo, fenômeno este que pode ocorrer via emissão por campo ou emissão catódica.

Segundo Scotti e Ponomarev (2008), o fato de os óxidos metálicos possuírem ligações atômicas inferiores à do metal puro facilita a saída de elétrons. Nesse cenário,

ilustrado na Figura 3, os elétrons emitidos são atraídos pelas cargas positivas, rompendo a camada de óxido e estabelecendo a coluna do arco devido ao gradiente de potencial elétrico.

Figura 3 - Representação esquemática da emissão por campo



Fonte: Scotti e Ponomarev (2008)

A tensão superficial é um dos parâmetros fundamentais que governam a molhabilidade durante o processo de soldagem. Entretanto, o potencial de oxidação da atmosfera de proteção pode alterar significativamente a energia superficial da poça de fusão. A presença de óxidos e a absorção de oxigênio atuam na redução da tensão superficial do metal líquido, o que favorece o espalhamento do material fundido sobre o metal de base. Essa interação entre a reatividade do gás de proteção e a termodinâmica da interface sólido-líquido é decisiva para definir o ângulo de contato e, conseqüentemente, a molhabilidade do cordão (Holmberg; Stenbacka, 1990 apud Costa, 2006).

Conforme abordado anteriormente, o O_2 e o CO_2 são classificados como gases de elevado potencial de oxidação. Scotti e Ponomarev (2008) esclarecem que gases de proteção constituídos por moléculas poliatômicas sofrem dissociação térmica ao serem submetidos às elevadas temperaturas do arco elétrico. Nesse processo, o O_2 dissocia-se em $O + O$, enquanto o CO_2 decompõe-se em $CO + O$. A liberação desses átomos de oxigênio livre no meio gasoso permite sua absorção pela poça de fusão, acelerando a formação de óxidos metálicos.

Recentemente, Trinh et al. (2024) demonstraram, ainda que em um processo híbrido de soldagem conceituado de Plasma-MIG ou Plasma-MAG, que a utilização

de atmosferas de proteção contendo percentuais controlados de O_2 ou CO_2 promove uma redução significativa na tensão superficial do metal líquido. Essa alteração nas propriedades físico-químicas da interface favorece o aumento da penetração, auxilia no controle de respingos e resulta em uma maior molhabilidade, evidenciada pela diminuição da convexidade dos cordões de solda. Tal comportamento corrobora a tese de que o oxigênio e o dióxido de carbono atuam como elementos tensoativos, modificando o gradiente de tensão superficial e, por conseguinte, a morfologia final da junta soldada.

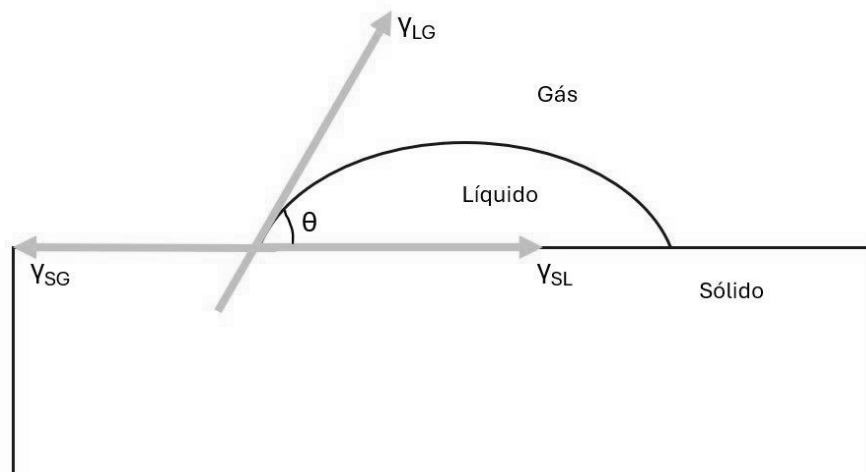
2.2 Molhabilidade

A molhabilidade é definida fisicamente como a propensão de um líquido, neste caso o metal de adição fundido, de permanecer em contato e se espalhar sobre uma superfície sólida (Kubiak et al., 2011). No contexto da soldagem, este fenômeno constitui um parâmetro crítico de qualidade, pois rege a morfologia do cordão de solda. Cordões que apresentam elevada molhabilidade resultam em geometrias com menor convexidade e ângulos de contato reduzidos, condição desejável para minimizar a concentração de tensões na margem da solda. Por outro lado, a baixa molhabilidade favorece a formação de cordões excessivamente convexos e irregulares, podendo ocasionar falhas de preenchimento e descontinuidades em operações de revestimento (Moura et al., 2018).

De acordo com Kubiak et al. (2011), a relação entre a molhabilidade e o ângulo de contato (θ), para condições ideais e superfícies isentas de rugosidade, foi estabelecida por Thomas Young. Esta relação é fundamentada no equilíbrio das tensões interfaciais atuantes no sistema: tensão sólido-gás (γ_{SG}), tensão líquido-gás (γ_{LG}) e tensão sólido-líquido (γ_{SL}). Segundo Zancan (2017), o ângulo de contato (θ) é definido pela angulação no ponto de encontro das três fases mencionadas, sendo mensurado a partir de uma reta tangente à interface líquido-gás e uma reta que segue a linha da interface sólido-gás, conforme ilustrado na Figura 4. A compreensão dessa relação fundamenta-se no fato de o ângulo teta (θ) atuar como um indicador inversamente proporcional à capacidade de molhamento do sistema, sendo governado pelo balanço entre as forças de adesão (interação entre a poça de fusão e a chapa de aço) e as forças de coesão interna do metal líquido. Em condições de alta molhabilidade, as forças de adesão superam as de coesão, induzindo o metal a se

espalhar sobre o substrato sólido, o que resulta em ângulos de contato baixos e em um cordão com perfil plano e transição suave nas margens. Por outro lado, cenários de baixa molhabilidade ocorrem quando as forças de coesão interna prevalecem, forçando o líquido a se contrair para minimizar sua área superficial, na prática da soldagem, esse comportamento se traduz em valores de (θ) e no surgimento de cordões excessivamente convexos e abaulados, cujas margens em formato de quina viva atuam como severos concentradores de tensões mecânicas e potenciais indutores de defeitos por falta de fusão lateral.

Figura 4 - Tensões atuantes na poça de fusão



Fonte: Adaptado de (Zancan, 2017)

A Equação 1 mostra a forma matemática proposta por Young que define as relações propostas na imagem:

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta \quad [1]$$

Matematicamente é possível analisar:

- Menor ângulo, maior γ_{SG} , portanto maior molhabilidade
- Maior ângulo, maiores γ_{SL} γ_{LG} , portanto menor molhabilidade

2.2.1 Molhabilidade na soldagem MIG/MAG

O processo de soldagem MIG/MAG fundamenta-se na fusão e deposição contínua de um metal de adição sobre o metal de base, sob a proteção de uma atmosfera gasosa quimicamente ativa ou inerte. Nesse sistema, o arco elétrico estabelecido entre a peça e o arame consumível atua como a fonte primária de calor concentrado, governando as taxas de fusão e as forças de destacamento metálico (Scotti e Ponomarev, 2008). Para uma análise precisa da molhabilidade e do espalhamento interfacial neste processo, torna-se imperativo investigar as variáveis operacionais que a influenciam, com destaque absoluto para a composição química e as propriedades físicas da atmosfera de proteção. Como a soldagem ocorre inteiramente sob o fluxo desse envelope gasoso, a seleção dos componentes da mistura exerce influência direta na morfologia macroscópica do cordão de solda. Conforme discutido por Costa (2006), meios com maior potencial de oxidação tendem a favorecer a molhabilidade devido à redução da energia livre superficial da poça, um fenômeno que atua de forma intrínseca e simultânea às propriedades térmicas de transporte de cada gás. De acordo com Fortes e Vaz (2005), gases que apresentam elevada condutividade térmica impõem uma maior dissipação de calor para o meio, exigindo uma tensão elétrica mais elevada na fonte para manter a estabilidade e a ionização da coluna de plasma, o que resulta em um aporte térmico global mais elevado distribuído ao sistema.

Elementos e compostos moleculares como o Hélio (He) e o Dióxido de Carbono (CO₂) destacam-se por possuírem alta condutividade térmica em temperaturas elevadas, promovendo uma transferência de calor mais homogênea e alargada para o substrato. Esse comportamento térmico resulta em uma poça de fusão mais fluida, com perfil de penetração característico e maior capacidade de espalhamento lateral do metal líquido. O CO₂ especificamente, além de sua marcante característica termofísica, sofre dissociação térmica sob as temperaturas extremas do arco elétrico, liberando átomos livres de oxigênio que são absorvidos pela poça de fusão. Esses átomos de oxigênio atuam como potentes agentes tensoativos devido à sua alta afinidade eletrônica, concentrando-se na interface líquido-gás e reduzindo drasticamente a tensão superficial (γ_{SL}) do metal fundido, o que decrementa o ângulo de contato (θ) e incrementa significativamente a molhabilidade da junta.

Adicionalmente, a interação metalúrgica entre o material de adição e o metal de base constitui um fator termodinâmico determinante. O balanço entre as forças de coesão internas do líquido e as forças de adesão na interface sólido-líquido define o grau de espalhamento, sendo governado rigorosamente pelo equilíbrio vetorial de tensões interfaciais descrito pela Equação de Young. Os estudos de Zilio et al. (2014) e Moura et al. (2018) concluem que cenários de incompatibilidade metalúrgica ou química entre os materiais de adição e de base, como na deposição de ligas de níquel ou aços inoxidáveis sobre aços ao carbono, alteram substancialmente a energia da interface sólido-líquido (γ_{SL}). Essa desconformidade dificulta os mecanismos de difusão atômica e ancoragem mecânica na linha de fusão, resultando em uma adesão interfacial ineficiente, cordões com tendências severas à convexidade e, conseqüentemente, prejuízos diretos à integridade estrutural e à qualidade geométrica da junta soldada.

Um outro parâmetro de relevância que deve ser destacado na análise dos fenômenos interfaciais é o efeito da rugosidade e do estado superficial do substrato. No trabalho de Mateus (2023), o referido autor investiga o impacto que a textura da superfície exerce sobre a molhabilidade do cordão de solda. Ainda que as variações micrométricas de rugosidade isoladas nem sempre apresentem resultados expressivos na soldagem, a literatura científica fundamenta esse comportamento por meio de dois modelos clássicos que expandem a termodinâmica idealizada pela Equação de Young (adotada como base para o presente trabalho, superfície ideal sem rugosidades): o modelo de Wenzel (1936) e o modelo de Cassie e Baxter (1944).

O modelo de Wenzel (1936) pressupõe um estado de molhamento homogêneo, no qual o metal fundido penetra completamente as ranhuras e reentrâncias da rugosidade superficial, por consequência, a área real de contato sólido-líquido é ampliada, fazendo com que uma superfície originalmente com boa molhabilidade torne-se ainda mais propensa ao espalhamento, como representado na Figura 5. Por outro lado, o modelo de Cassie e Baxter (1944) descreve um regime heterogêneo, onde o metal fundido, devido à sua alta tensão superficial ou à geometria dos vales, entra em contato apenas com os picos da rugosidade, enquanto as cavidades subjacentes permanecem preenchidas por bolsões de gases atmosféricos aprisionados, ilustrado na Figura 6, o que restringe o espalhamento e eleva o ângulo de contato aparente (Kubiak et al., 2011).

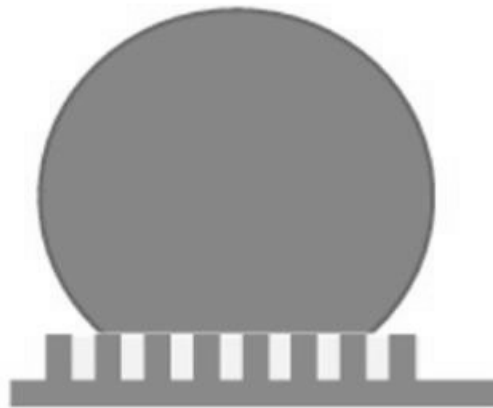
No entanto, para além da rugosidade geométrica pura, o estudo de Mateus (2023) demonstrou que a presença de carepas de laminação no metal de base exerceu uma influência significativamente superior na molhabilidade. Sob a ótica da metalurgia física, a carepa constitui uma camada complexa de óxidos de ferro que altera drasticamente a energia livre da interface sólido-gás e da interface sólido-líquido quando comparada ao aço carbono puramente lixado ou usinado (Costa, 2006). Como a afinidade termodinâmica e a difusão atômica entre o metal de adição fundido e uma película de óxido são distintas daquelas verificadas em uma matriz metálica limpa, o espalhamento da poça de fusão são severamente modificados. Diante disso, ratifica-se que o fator superfície configura um critério crucial e indispensável ao se avaliar as variações de molhabilidade e a homogeneidade geométrica de cordões de solda (Fortes e Vaz, 2005; Mateus, 2023).

Figura 5 – Modelo de Wenzel



Fonte: Zancan (2017)

Figura 6 – Modelo de Cassie e Baxter



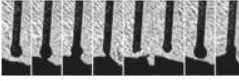
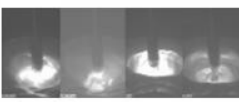
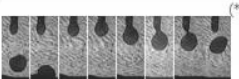
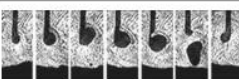
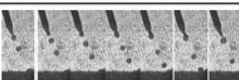
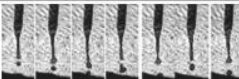
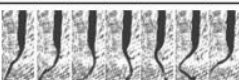
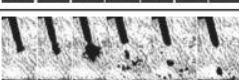
Fonte: Zancan (2017)

Outro fator que governa o contexto da geometria do cordão de solda dentro desse contexto é o tipo de transferência metálica, no processo de soldagem MIG/MAG constitui um dos fenômenos mais complexos e determinantes para a qualidade, produtividade e acabamento geométrico das uniões soldadas. De acordo com Fortes e Vaz (2005) e Scotti e Ponomarev (2008), esse processo define o mecanismo físico pelo qual o consumível na forma de arame é continuamente fundido pelo arco elétrico e transportado até a poça de fusão. A dinâmica desse transporte em voo livre ou por contato direto é governada por um balanço crítico de forças atuantes na extremidade do eletrodo, que incluem a força gravitacional, a força eletromagnética (força de Lorentz ou efeito pinch), o arrasto plasmático e, de forma contrária ao destacamento, a força de tensão superficial (Kou, 2003).

A atmosfera protetiva exerce um papel de protagonismo absoluto na definição do modo de transferência metálica, uma vez que as propriedades térmicas (condutividade térmica e potencial de ionização) e químicas (potencial de oxidação) dos gases alteram substancialmente a morfologia do arco e a termofísica do metal líquido (Zilio et al., 2014). Tradicionalmente, conforme documentado em manuais metalúrgicos (Fortes e Vaz, 2005), os modos de transferência dividem-se em categorias principais: curto-circuito, globular, spray e pulsado, cada qual apresentando uma correlação intrínseca com a composição da mistura gasosa empregada. A transferência por curto-circuito manifesta-se em faixas operacionais de baixa corrente e baixa tensão de soldagem. Nesse modo, o arame-eletrodo avança até tocar

fisicamente o metal líquido da poça de fusão, provocando a extinção momentânea do arco elétrico. O destacamento da gota ocorre por contato mecânico direto associado à ação da tensão superficial, que "puxa" o material fundido para a poça, reestabelecendo o arco elétrico em seguida (Fortes e Vaz, 2005). A ocorrência da transferência globular está intimamente atrelada ao uso de gases moleculares puros, como o CO_2 . Conforme explicam Scotti e Ponomarev (2008), gases moleculares exigem um elevado aporte de energia térmica para sofrer dissociação molecular e posterior ionização na coluna do arco. Essa restrição física provoca o estreitamento e a compressão das raízes do arco na base inferior da gota de metal líquido, gerando uma força de repulsão eletromagnética ascendente. Essa força opõe-se ao destacamento axial, resultando em uma transferência do tipo "globular repelida", marcada por instabilidade operacional, oscilações severas na tensão elétrica e alta incidência de respingos que comprometem o acabamento lateral e a convexidade do cordão de solda. Na transferência por Spray o metal de adição é transferido sob a forma de uma fina névoa de gotículas minúsculas (com diâmetros inferiores ao do arame), projetadas axialmente em alta velocidade diretamente através da coluna do arco elétrico. O arco permanece contínuo e estável, proporcionando taxas elevadas de deposição, penetração profunda e total isenção de respingos. A Figura 7 representa de forma visual as classes e os tipos de transferência metálica empregados na soldagem MIG/MAG.

Figura 7 – Modos de transferência metálica

Grupos de transferência	Modo de transferência	Imagem	Força (efeito) governante principal
Por contato	Por curto-circuito		Tensão superficial e efeito <i>pinch</i>
	Por “ponte”		Tensão superficial
	Por curto-circuito forçado		Efeito <i>pinch</i> pronunciado
Por voo livre	Globular		Gravitacional
	Globular repulsiva		Força gravitacional e forças de repulsão
	Goticular (ou goticular projetada)		Força eletromagnética
	Goticular com alongamento		
	Goticular rotacional		
	Explosiva		Força eletromagnética e reações químicas

Fonte: Scotti e Ponomarev (2008)

2.3 Parâmetros de Soldagem

No processo de soldagem MIG/MAG, a manipulação das variáveis operacionais permite modular a hidrodinâmica (efeito Marangoni) da poça de fusão e a geometria do cordão. A corrente de soldagem constitui um fator crítico no cenário da molhabilidade, visto que o incremento da intensidade de corrente eleva o aporte térmico global do sistema por meio do efeito Joule. Conforme os princípios termodinâmicos discutidos anteriormente, este aumento de temperatura reduz a viscosidade e a tensão superficial do metal líquido, atuando como um elemento atuante para o aumento da molhabilidade. Associada a este balanço térmico a velocidade de soldagem (deslocamento) desempenha um papel essencial taxas de deslocamento mais baixas resultam em maior densidade de energia linear, permitindo que o metal permaneça no estado líquido por um período prolongado, o que favorece o seu espalhamento interfacial antes da solidificação (Easterling, 1992).

De acordo com Modenesi, Marques e Santos (2011), o comprimento do arco elétrico exibe uma relação de proporcionalidade direta com a tensão de soldagem operada no processo. Sob maiores patamares de tensão, a coluna de plasma expande-se lateralmente, assumindo uma geometria cônica expandida que distribui o fluxo de calor e a densidade de corrente sobre uma área maior do substrato. Essa dispersão geométrica da energia atenua a pressão mecânica localizada exercida pelo jato de plasma e altera as forças eletromagnéticas internas, como a força de Lorentz, que atua no sentido de empurrar o metal líquido para baixo (Kou, 2003). Com a suavização dessas pressões no centro da poça, o perfil do reforço do cordão torna-se menos convexo e mais achatado. Consequentemente, esse contorno plano viabiliza que o metal de adição fundido interaja e molhe o metal de base de forma mais eficiente, otimizando a transição geométrica nas margens da junta (Fortes e Vaz, 2005). Por outro lado, o equilíbrio termofísico desse sistema depende intrinsecamente da estabilidade do arco; variações intempestivas no seu comprimento modificam a impedância do plasma e geram flutuações severas na tensão de soldagem, promovendo instabilidades que rompem a uniformidade do cordão e prejudicam a regularidade da molhabilidade ao longo da junta soldada (Costa, 2006).

O volume do cordão constitui uma resposta direta da interação físico-química entre a velocidade de alimentação do consumível e a sua respectiva taxa de fusão anódica ou catódica. Modificações na velocidade de alimentação alteram a densidade de corrente e a resistência elétrica do plasma, deslocando o ponto de operação estável do arco elétrico. Simultaneamente, a velocidade de soldagem manipula o volume de metal depositado por unidade de comprimento e governa o perfil hidrodinâmico e o gradiente térmico da poça de fusão sob a coluna de plasma, alterando o balanço de energia necessário para o espalhamento interfacial do metal líquido (Scotti e Ponomarev, 2008). De acordo com os fundamentos descritos por Kou (2003), esse balanço térmico determina a viscosidade e as correntes de convecção internas do metal fundido, influenciando diretamente as forças de coesão que atuam nas margens do cordão. Diante disso, constata-se que, para mitigar flutuações na molhabilidade e no ângulo de contato devido a mudanças indesejadas de volume, quaisquer alterações na velocidade de soldagem exigem uma adequação controlada e proporcional na velocidade de alimentação do arame (Fortes e Vaz, 2005). Esse ajuste concomitante preserva a energia líquida de soldagem estável por milímetro de

cordão, neutralizando variações dimensionais abruptas e assegurando a homogeneidade geométrica e a reprodutibilidade dos ensaios em todas as amostras avaliadas.

2.4 Gases de proteção

Conforme mencionado anteriormente, o processo de soldagem MIG/MAG é obrigatoriamente executado sob o fluxo contínuo de uma atmosfera de proteção, a qual pode apresentar caráter estritamente inerte ou quimicamente ativo e reativo. Segundo Fortes e Vaz (2005), o objetivo primordial e imediato desses gases de proteção é isolar a poça de fusão e a transferência metálica das reações químicas deletérias com o ar atmosférico circundante, blindando o metal de solda contra contaminações que comprometeriam severamente a morfologia intrínseca, microestrutura e suas propriedades mecânicas finais. Adicionalmente, o envelope gasoso desempenha um papel fundamental na termofísica do processo, atuando diretamente na estabilidade elétrica do arco, na condutividade térmica do sistema, no perfil de penetração e na molhabilidade interfacial do metal depositado (Scotti e Ponomarev, 2008).

A eficiência dessa proteção gasosa manifesta-se na capacidade cinética de impedir que o metal fundido, que se encontra em estados térmicos de altíssima reatividade, interaja com elementos indesejados presentes no ar ambiente, majoritariamente o nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e o hidrogênio (H_2). De acordo com os fundamentos descritos por Kou (2003), o nitrogênio apresenta uma elevada solubilidade térmica no ferro líquido a altas temperaturas, contudo durante o rápido resfriamento e a subsequente solidificação da poça, essa solubilidade cai abruptamente, fazendo com que o gás seja rejeitado da matriz sólida e fique aprisionado na forma de porosidades macroscópicas ou precipite na forma de nitretos frágeis nos contornos de grão. Similarmente, a intrusão do oxigênio atmosférico descontrolado induz a uma oxidação severa dos elementos de liga essenciais (como o silício e o manganês), gerando grandes inclusões não metálicas e óxidos frágeis que atuam como concentradores de tensão, reduzindo drasticamente a tenacidade ao impacto e a integridade estrutural da junta soldada. Contudo, a utilização controlada desses elementos oxidantes em misturas gasosas binárias ou ternárias é uma prática industrial e científica comum para otimizar o comportamento reológico da poça.

Conforme discutido por Costa (2006), adições minoritárias de gases ativos em bases inertes alteram o potencial de ionização do meio e a emissão eletrônica no cátodo, estabilizando a raiz do arco e reduzindo a taxa de respingos. Além disso, as propriedades físicas do gás, tais como a densidade e a viscosidade cinemática, são parâmetros críticos para assegurar a rigidez e a eficácia da cobertura.

Sob a ótica da mecânica dos fluidos, gases que apresentam densidade relativa superior à do ar atmosférico, como o argônio, tendem a se depositar e a deslocar o ar ambiente com maior facilidade, uma proteção mais robusta da poça de fusão, especialmente em posições de soldagem plana (Scotti e Ponomarev, 2008). Por sua vez, gases moleculares como o Dióxido de Carbono (CO₂), apesar de imporem maiores desafios operacionais devido à sua dissociação endotérmica no arco, oferecem vantagens térmicas ímpares em termos de condutividade calórica global. A caracterização sistemática dessas propriedades termofísicas, tais como densidade, potencial de ionização e condutividade, serve como fundamentação técnica para justificar e consolidar o uso combinado do Argônio e do dióxido de Carbono como os principais elementos protetivos e moduladores da geometria do cordão (Fortes e Vaz, 2005; Zilio et al., 2014). A Tabela 1 ilustra os valores densidade e potencial de ionização dos elementos citados nesse trabalho.

Tabela 1 - Propriedades dos gases de proteção

Gás	Densidade (kg/m³)	Potencial de Ionização (eV)
Argônio	1,78	15,8
Dióxido de carbono	1,98	14,4
Hélio	0,18	24,6
Hidrogênio	0,07	13,5
Nitrogênio	1,16	14,5
Oxigênio	1,33	13,2

Fonte: Adaptado de Scotti e Ponomarev (2008)

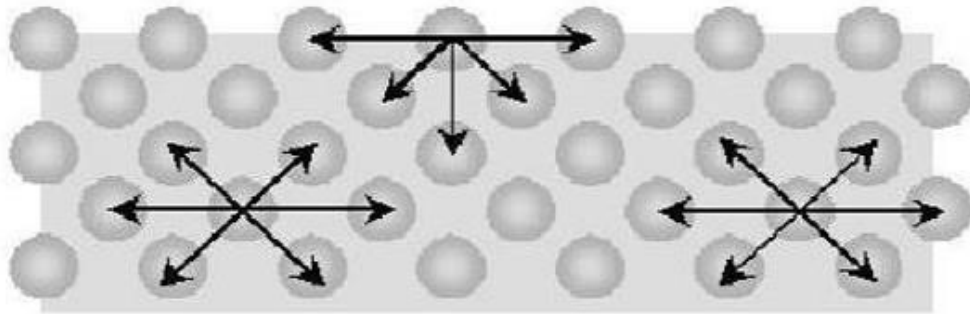
Outro ponto associado a reatividade do gás é a estabilidade do arco, como já mencionado neste trabalho a escolha do gás de proteção é influenciada pelo nível de reatividade dos materiais fundidos, no entanto a capacidade de estabilização do arco elétrico também sofre grande influência do gás, gases com menor potencial de

ionização demandam menos energia ao sistema e por consequência menor variação do arco. Como mencionado anteriormente, a utilização de misturas gasosas busca criar atmosferas combinadas que herdaram as características físicas e químicas de cada um de seus componentes, associando as vantagens individuais de cada gás (Scotti; Ponomarev, 2008). O argônio (Ar) é um gás inerte que facilita a abertura e a manutenção do arco elétrico. Ao adicionar oxigênio (O_2) a uma base de argônio, busca-se reduzir a tensão superficial, o que aumenta a taxa de fusão, induz a transferência metálica por pulverização (spray) e melhora a fluidez da poça de fusão. Por outro lado, a adição de dióxido de carbono (CO_2) ao argônio permite obter uma solda estável e com baixos níveis de respingos uma melhoria significativa quando comparada ao comportamento do dióxido de carbono 100% puro, que é marcado pela alta instabilidade e geração de respingos (Fortes; Vaz, 2005).

2.5 Energias superficiais

A tensão superficial é definida como a manifestação macroscópica do desequilíbrio das forças interatômicas na interface de um líquido. No interior da poça de fusão, os átomos encontram-se em um estado de equilíbrio simétrico, sendo atraídos igualmente em todas as direções pelas partículas vizinhas. Em contrapartida, os átomos situados na superfície livre experimentam uma força resultante direcionada para o interior do volume líquido, uma vez que não possuem vizinhos na fase gasosa superior para compensar as interações atrativas. Esse desequilíbrio gera uma energia residual que tende a minimizar a área superficial da massa líquida, conferindo à gota de metal fundido uma tendência à geometria esférica (Zancan, 2017). Na soldagem, essa força coesiva atua como uma barreira ao espalhamento do material: quanto maior a tensão superficial, menor será a capacidade de o metal de adição "molhar" o metal de base. A Figura 8 ilustra esquematicamente essa distribuição de forças e o comportamento dos átomos no metal fundido.

Figura 8 - Representação de forças intermoleculares em um líquido

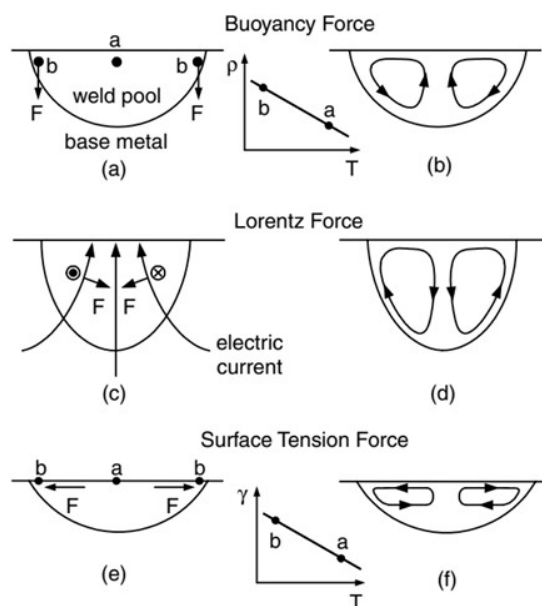


Fonte: Zancan (2017)

No eletrodo consumível, a energia superficial atua como uma força de resistência ao destacamento da gota, sendo superada apenas quando as forças de propulsão (como a força eletromagnética e a gravidade) prevalecem. No âmbito da molhabilidade, essa tensão é regida pela equação de Young, conforme descrito por Kubiak et al. (2011). A introdução de elementos que atuam como redutores de tensão superficial, como O_2 e CO_2 , minimizam o desequilíbrio das forças internas, permitindo que o metal fundido se espalhe sobre o metal de base em vez de ser atraído para o centro da poça sob a forma de uma geometria convexa, (Holmberg; Stenbacka, 1990 apud Costa, 2006).

Além das tensões superficiais, a geometria final do cordão é significativamente influenciada por fatores associados à dinâmica do fluxo de fluidos. Kou (2003) afirma que forças de empuxo (buoyancy), causadas por gradientes de densidade decorrentes da variação de temperatura, e forças de campo magnético (Lorentz), induzidas pela densidade de corrente, determinam o padrão de circulação do metal líquido. Como ilustrado na Figura 9, a presença de elementos tensoativos é capaz de inverter o sentido desses fluxos convectivos (Efeito Marangoni), promovendo um perfil de poça de fusão com maior capacidade de espalhamento e penetração, otimizando assim a molhabilidade e a estabilidade da junta soldada.

Figura 9 - Fatores que movimentam a poça de fusão



Fonte: Kou (2003)

O efeito Marangoni, ou convecção termocapilar, constitui um fenômeno fluidodinâmico determinante para a morfologia macroscópica final e para a relação de aspecto do cordão de solda, sendo influenciado de forma direta e instantânea pelo potencial de oxidação do gás de proteção. Este efeito descreve o fluxo tridimensional de massa ao longo de uma interface líquida motivado pela existência de gradientes de tensão superficial. Na soldagem ao arco elétrico, como a região central da poça de fusão (imediatamente abaixo da coluna de plasma) apresenta temperaturas significativamente mais elevadas do que as suas bordas periféricas, estabelece-se um diferencial térmico intrínseco que induz a movimentação do metal líquido. Em metais puros ou em ligas isentas de impurezas quimicamente ativas, o coeficiente de temperatura da tensão superficial é negativo, o que significa que a tensão superficial decresce linearmente com o aumento da temperatura. Consequentemente, a maior tensão superficial localizada nas extremidades frias exerce uma força de cisalhamento que puxa o metal fundido do centro quente para as bordas, gerando um perfil de escoamento puramente divergente e resultando em cordões largos, rasos e de baixa penetração (Kou, 2003). Todavia, a absorção de elementos tensoativos e segregantes na superfície do líquido, provenientes da dissociação térmica de gases ativos como o O_2 e o CO_2 no arco elétrico, inverte por completo esse gradiente termofísico. Sob a presença de teores controlados de oxigênio livre dissolvido na poça, o coeficiente de

temperatura passa a apresentar um comportamento positivo dentro de uma determinada faixa metalúrgica. Nesse cenário modificado, a tensão superficial torna-se superior nas regiões centrais mais quentes, fazendo com que as forças de cisalhamento interfacial direcionem o fluxo de metal fluido das bordas frias para o centro e, por continuidade hidrodinâmica, verticalmente para a raiz da junta soldada. Conforme salientado pioneiramente por Heiple e Roper (1982) e referendado amplamente pela literatura metalúrgica (Kou, 2003; Scotti e Ponomarev, 2008), essa inversão do fluxo de convecção de Marangoni altera profundamente a distribuição do aporte de calor no substrato, sendo a principal força promotora do aumento da penetração e da melhoria expressiva da molhabilidade lateral em atmosferas quimicamente ativas.

Em síntese, o fenômeno da molhabilidade no processo de soldagem MIG/MAG configura o resultado macroscópico de um equilíbrio dinâmico e transiente entre forças físico-químicas de interface e parâmetros operacionais de entrada. Sob condições teóricas ideais e superfícies perfeitamente planas, homogêneas e isentas de imperfeições metalúrgicas, esse comportamento é regido matematicamente pela Equação de Young, a qual estabelece a dependência estrita do ângulo de contato (θ) em relação ao balanço vetorial das energias livres interfaciais sólido-gás, sólido-líquido e líquido-gás. Contudo, na prática metalúrgica, essa condição de equilíbrio estático é constantemente modulada e perturbada pelas variáveis cinéticas do processo. Parâmetros como a tensão elétrica do arco, a energia líquida de soldagem a dinâmica de transferência metálica e o potencial oxidante do envelope gasoso atuam de forma sinérgica na alteração da viscosidade e da tensão superficial do metal líquido (Fortes e Vaz, 2005; Zilio et al., 2014). Portanto, o controle rigoroso e a automação dessas variáveis operacionais são os fatores que permitem a manipulação previsível do fluxo de calor, da hidrodinâmica interna da poça e das tensões interfaciais, garantindo uma influência direta e reprodutível sobre a molhabilidade e a integridade geométrica da junta soldada.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados os materiais, equipamentos e os procedimentos experimentais adotados para a avaliação da influência do potencial de oxidação dos gases de proteção na molhabilidade do metal de adição.

3.1 Materiais e Equipamentos

Para a realização dos ensaios, foram utilizadas chapas de aço comum com espessura de 10 mm. Inicialmente as chapas foram demarcadas com um marcador industrial, cada chapa foi subdividida em cinco seções, com aproximadamente 30 mm de largura entre as seções e comprimento de 300 mm, não foi realizado nenhum tipo de tratamento ou limpeza das chapas. Após isso, as chapas foram cortadas em tiras, seguindo as linhas traçadas. O corte do material foi realizado por corte a plasma, na qual uma característica deste equipamento é a perda de material (sangria) durante o processo o que impossibilita de garantir com precisão a largura desejada da chapa. Como o trabalho de Mateus (2023) não indicou influência da rugosidade sobre os dados de molhabilidade não foi realizada a medição com o rugosímetro. A execução dos cordões de solda foi realizada de forma automatizada, utilizando-se uma fonte de soldagem inversora modelo Fronius TPS400i, operando no processo MIG/MAG com tensão constante, o metal de adição utilizado eletrodo AWS ER70S-6 com 1 mm de diâmetro. A automatização do deslocamento da tocha foi garantida por um braço robótico Yaskawa, que opera com 6 graus de liberdade, assegurando o controle rigoroso da velocidade de soldagem, da Distância Bico de Contato-Peça (DBCP), eliminando variáveis inerentes à operação manual. Os parâmetros de soldagem, como corrente e tensão, foram medidos pelo software da fonte (Fronius WeldCube), que realiza a aquisição no instante de soldagem. As Figuras 10 (a) e (b) ilustram tanto a fonte quanto o braço robótico usado.

Figura 10 - Equipamentos utilizados para confecção das amostras



(a) Fonte de solda

(b) Braço robótico

Fonte: autoria própria

3.2 Atmosferas de Proteção (Gases)

Para avaliar o impacto do potencial de oxidação na geometria do cordão e na molhabilidade, foram selecionadas seis condições distintas de proteção gasosa, para cada condição foram realizados 3 cordões de solda, a uma vazão de 15L/min. As combinações utilizadas foram:

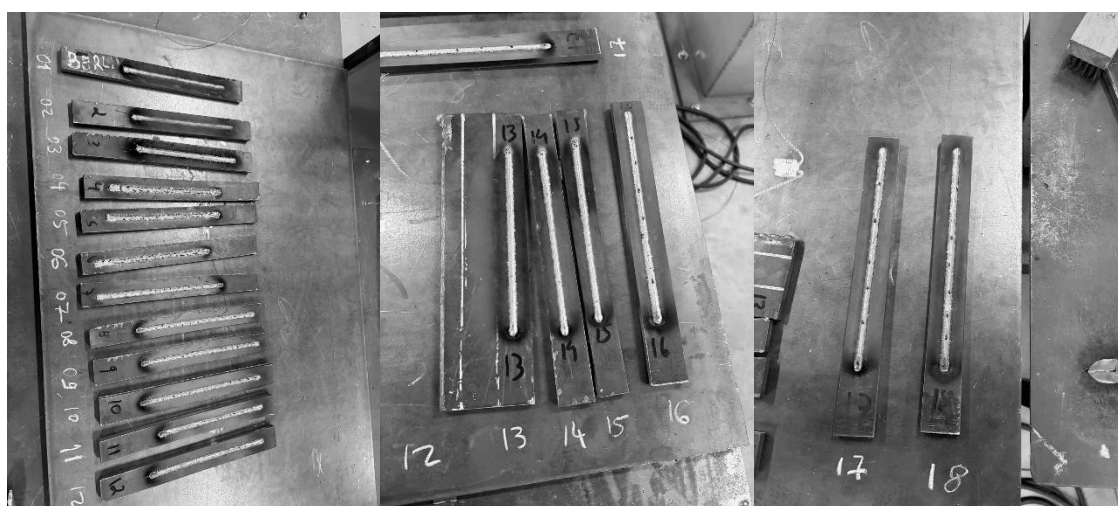
- 100% Argônio (Cordões 1 a 3)
- 100% CO₂ (Cordões 4 a 6)
- Argônio + 15%CO₂ (Cordões 7 a 9)
- Argônio + 20%CO₂ (Cordões 10 a 12)
- Argônio + 8%CO₂ (Cordões 13 a 15)
- Argônio + 2%O₂ (Cordões 16 a 18)

A seleção das atmosferas de proteção avaliadas neste trabalho fundamenta-se no fato de estas composições representarem os gases mais amplamente utilizados no setor industrial e por serem amplamente estudados pela literatura metalúrgica, conforme apontado por Modenesi, Marques e Santos (2011) e Scotti e Ponomarev (2008).

3.3 Confeção das Amostras

Previamente à execução das amostras definitivas, foram realizados ensaios preliminares em chapas de descarte para cada atmosfera gasosa investigada. Esta etapa teve como finalidade estabelecer as variáveis operacionais adequadas e a manutenção do comprimento do arco elétrico ao longo de todo o experimento. O comprimento do arco elétrico foi garantido de forma puramente visual, observando o processo de abertura do arco. Esse fator exerce influência direta sobre a morfologia do cordão de solda, uma vez que a distância entre a ponta do eletrodo e a peça governa a resistência elétrica do canal de plasma e a distribuição do calor. Como o arco elétrico assume um formato cônico, um arco mais longo expande a base desse cone, dispersando a energia térmica por uma área maior do substrato e alterando significativamente a largura do cordão. Diante disso, a manutenção padronizada do tamanho de arco em todas as diferentes amostras do trabalho foi um requisito indispensável para viabilizar a comparação estatística entre os seis grupos experimentais. Como cada gás testado possui propriedades térmicas e potenciais de ionização distintos, o controle dimensional do arco buscou garantir que as alterações observadas na molhabilidade e no ângulo de contato fossem decorrentes exclusivamente do potencial de oxidação de cada atmosfera de proteção. A Figura 11 demonstram o resultado dos cordões realizados:

Figura 11 – Resultado final dos cordões de solda



(a) Cordões de 1 a 12 (b) cordões de 13 a 16 (c) cordões 17 e 18

Fonte: autoria própria

Para garantir o mesmo volume de cordão em todos os testes, fundamentou-se uma relação de proporcionalidade direta entre a velocidade de soldagem e a velocidade de alimentação do arame, de modo que uma alteração em uma dessas variáveis exigisse uma compensação equivalente na outra.

A definição da tensão de soldagem, que proporcionasse o mesmo comprimento aproximado de arco, para cada mistura foi baseada no trabalho desenvolvido por Niz (2023). O autor utilizou uma tensão de 20V para argônio puro e 24 V para CO₂ puro, para o presente trabalho foi adicionado 2 V para cada gás, Niz realizou testes com a mistura Ar + 25%CO₂ com uma tensão de 22V, nesta pesquisa foi utilizado 24V como tensão de soldagem para misturas com 15 e 20% de CO₂. As alterações feitas em relação ao trabalho referenciado anteriormente se justificam devido a algumas diferenças no processo de fabricação das amostras, o trabalho atual utilizou de uma fonte de soldagem diferente do usado por Niz, além disso o diâmetro do metal de adição também foi diferente, 1 mm para o estudo atual e 1,2 mm para o estudo anterior. As outras duas misturas, Ar + 2%O₂ e Ar + 8%CO₂ não tinham referências pré-definidas, portanto durante os pré-testes realizados foram escolhidos os valores de tensão que geravam comprimentos do arco e largura do cordão semelhantes aos realizados com apoio de embasamento bibliográfico. O comprimento do arco foi garantido de forma visual, permitindo que o arco tivesse o mesmo comprimento que as demais misturas. A velocidade de alimentação de arame foi ajustada para que a corrente de soldagem ficasse com o valor aproximado de 120 A para todas as condições ensaiadas. A Tabela 2 mostra os parâmetros selecionados, os valores de corrente e tensão de soldagem são uma média dos valores obtidos pelo software da fonte. O tipo de transferência presente em todas as atmosferas é a transferência por curto-circuito.

Tabela 2 - Parâmetros de soldagem selecionados

Atmosfera	Tensão da fonte (V)	Tensão de soldagem (V)	Corrente de soldagem (A)	Velocidade de alimentação (m/min)	Velocidade de soldagem (cm/min)
Ar	22	20,80	120,67	4,50	28
CO ₂	26	24,96	117	5,0	31
Ar + 15%CO ₂	24	22,80	118	4,50	28
Ar + 20%CO ₂	24	22,80	119,67	4,50	28
Ar + 5%O ₂	21	19,80	120,30	4,50	28
Ar + 8%CO ₂	23	21,80	121	4,50	28

Fonte: autoria própria

Antes da inicialização dos ensaios com uma nova composição de gás de proteção, realizaram-se análises prévias nas chapas de descarte para certificar o adequado comprimento do arco e o volume de metal fundido, em cenários que demandavam alterações na velocidade de alimentação, a velocidade de soldagem era corrigida de forma estritamente proporcional. Para cada atmosfera de proteção, foram executados três cordões de solda, imediatamente antes da abertura do arco em cada amostra, a Distância Bico de Contato-Peça (DBCP) era aferida e ajustada em 15 mm, tanto no ponto inicial quanto no ponto final da trajetória, com o auxílio de um bloco padrão. Essa verificação geométrica é necessária para evitar variações indesejadas nos parâmetros de soldagem ao longo do cordão.

Após a manufatura de cada cordão, os valores de corrente e tensão de soldagem foram monitorados e coletados diretamente por meio do sistema de aquisição de dados integrado ao software da fonte de soldagem. No total, foram executados 18 cordões de solda, sendo 3 cordões para cada grupo de atmosfera.

3.4 Método de análise da molhabilidade

Após a execução dos cordões, as chapas foram seccionadas transversalmente em três partes com o auxílio de uma cortadora metalográfica presente no laboratório de microscopia da universidade, A Figura 12 ilustra o formato final do cordão. Esse procedimento gerou um total de 54 amostras para análise, distribuídas em 6 grupos experimentais (conforme a atmosfera de proteção), contendo 9 amostras por grupo.

Na sequência, a superfície cortada de cada amostra foi fotografada, através da câmera de um aparelho celular, para a avaliação do perfil geométrico. As imagens obtidas foram importadas para o software ImageJ com o objetivo de quantificar a molhabilidade do depósito. Utilizando a ferramenta Angle do programa, realizou-se a medição do ângulo de contato (θ) formado entre a margem do cordão de solda e a superfície do metal de base, seguindo o método ilustrado anteriormente na Figura 4, para parametrizar o software foi usado a espessura de cada chapa como dimensão de referência, permitindo que o software possa realizar a conversão de pixels para unidades métricas, essa medição foi realizada através de um paquímetro comum com resolução de 0,05mm. Por fim, os valores coletados foram tabulados no software Excel, no qual foram calculadas a média aritmética e o desvio padrão amostral para cada condição de atmosfera protetora testada.

Figura 12 – Formato final do cordão após o corte

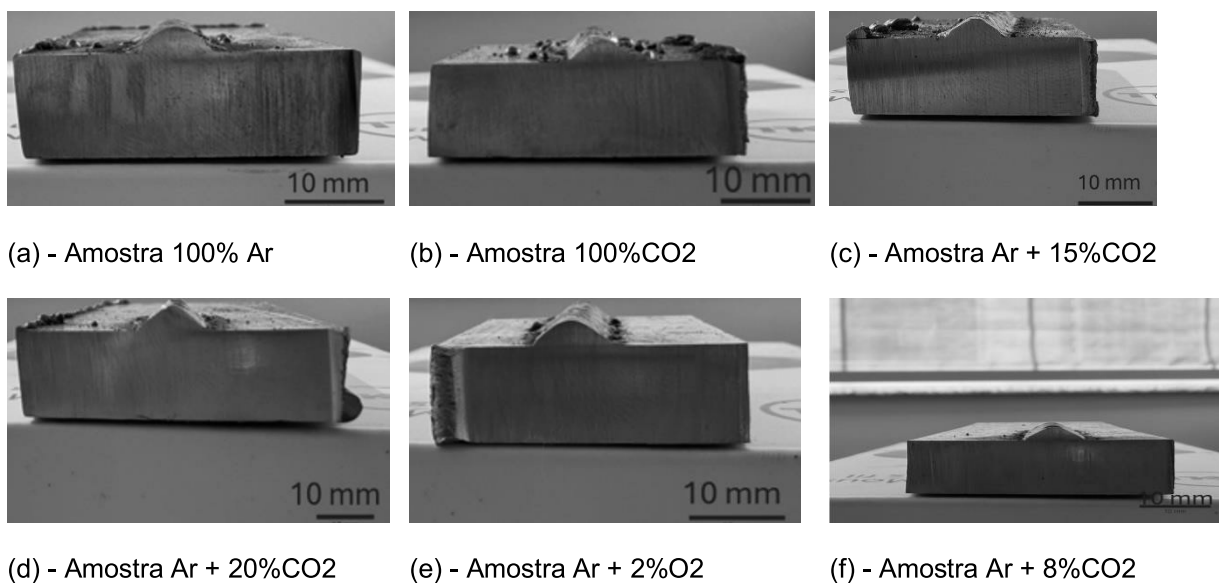


Fonte: autoria própria

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após os cortes na cortadora metalográfica iniciou-se a análise das imagens no software para posterior aferição do ângulo de contato, a Figura 13 ilustra uma amostra de cada grupo analisado.

Figura 13 - Imagens das amostras para cada atmosfera testada



Fonte: autoria própria

Os resultados obtidos após análise das imagens se encontram na Tabela 3, os ângulos de contato para cada atmosfera estudada bem como os respectivos desvios padrões amostrais. As medições para cada amostra se encontram no Apêndice A deste presente trabalho.

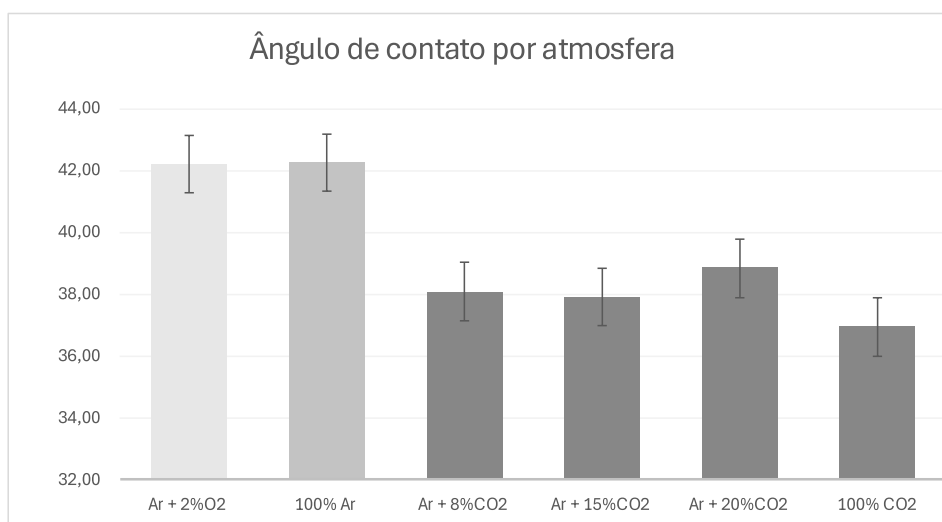
Tabela 3 - Ângulos de contato para cada grupo estudado

Gás	Ângulos (°)	Desvio Padrão Amostral
Ar + 2%O ₂	42,21	2,11
100% Ar	42,26	1,45
100% CO ₂	36,95	1,88
Ar + 8% CO ₂	38,08	2,06
Ar + 15% CO ₂	37,90	2,01
Ar + 20%CO ₂	38,84	1,80

Fonte: autoria própria

A fim de permitir uma análise comparativa e imediata do processo frente às diferentes atmosferas testadas, os valores médios calculados foram consolidados graficamente. A Figura 14 apresenta o comportamento do ângulo de contato obtido para cada grupo experimental, o eixo X está dividido entre os gases puros de referência, as misturas binárias com teores crescentes de CO₂ e a mistura contendo O₂ e o eixo Y contém as angulações de contato. No topo de cada coluna, encontram-se indicadas as respectivas barras de erro associadas ao desvio padrão amostral.

Figura 14 - Visão gráfica dos resultados obtidos



Fonte: autoria própria

A partir dos dados consolidados na Tabela 3 e no gráfico da Figura 10, é perceptível o impacto do dióxido de carbono puro na redução do ângulo de contato e, por conseguinte, no incremento da molhabilidade do cordão. Ao confrontar os grupos que utilizam misturas contendo dióxido de carbono com as atmosferas isentas desse componente, torna-se perceptível a ação tensoativa promovida pelo CO₂, a atmosfera pura de CO₂ registrou uma queda de 12% no ângulo de contato em comparação com argônio puro, cenário este que se alinha estritamente com a literatura de Moura et al. (2018). Ao analisar o gráfico de variação do ângulo, constata-se uma redução sistemática e estatisticamente significativa nos valores do ângulo de contato (θ) à medida que o Dióxido de Carbono é introduzido, em comparação ao cenário sob Argônio puro. Para compreender o mecanismo físico por trás dessa transição morfológica, faz-se necessário resgatar os pontos na revisão bibliográfica deste trabalho. Conforme estabelecido pela Equação de Young, o ângulo de contato

interfacial é o resultado direto do equilíbrio vetorial entre três energias livres: as tensões sólido-gás (γ_{SG}), sólido-líquido (γ_{SL}) e líquido-gás (γ_{LG}). Sob altas temperaturas no arco elétrico, as moléculas de CO_2 sofrem dissociação térmica, liberando oxigênio livre que é prontamente absorvido pelo metal líquido da poça de fusão. Esse oxigênio atua como um agente tensoativo de alta afinidade, concentrando-se na superfície da gota e reduzindo drasticamente a sua energia coesiva interna, ou seja, reduzindo a tensão superficial líquido-gás (γ_{LG}). Sob a ótica das forças intermoleculares, essa atenuação em γ_{LG} altera o balanço de forças em favor das forças de adesão entre o metal líquido e o substrato sólido de aço carbono. Com menor resistência interna à deformação (menor força de coesão), o volume de metal depositado tende a se espalhar mais livremente sobre a chapa. Na modelagem matemática de Young, a diminuição de γ_{LG} exige que o termo $\cos \theta$ aumente para restabelecer o equilíbrio do sistema, o que força o ângulo teta (θ) a decrescer. Esse fenômeno justifica a transição de um cordão originalmente convexo e restrito, presente na atmosfera de Argônio puro (onde a alta tensão superficial do metal líquido impede o espalhamento), para um cordão de solda com perfil plano, excelente espalhamento lateral e margens com transições geométricas suaves, ratificando empiricamente o papel do dióxido de carbono na formação do cordão de solda.

Analisando apenas as atmosferas com mistura de argônio mais dióxido de carbono é possível afirmar que o aumento gradativo do percentual de CO_2 estatisticamente não apresenta resultados expressivos na molhabilidade, ainda que graficamente é constatado uma leve tendência de variação. Segundo Trinh (2024) teores excessivos de gás ativo passam a contrair a coluna de plasma e a alterar a pressão sob a poça de fusão, afetando o comportamento da transferência metálica, essa tendência de comportamento, ainda que sutil, é percebida na mistura $\text{Ar} + 20\%\text{CO}_2$, em que há uma leve piora da molhabilidade ao se comparar com as demais misturas de dióxido de carbono.

Adicionalmente, constata-se que os grupos experimentais operados sob atmosferas de $\text{Ar} 100\%$ e $\text{Ar} + 2\%\text{O}_2$ obtiveram resultados de ângulo de contato estatisticamente semelhantes, com sobreposição quase integral de seus desvios padrões. Esse comportamento vai contra a literatura de Trinh (2024), que afirma sobre a influência positiva do oxigênio como fator de melhora na molhabilidade, atuando como um tensoativo e por consequência melhorando a molhabilidade. O teor de

apenas 2% de oxigênio na mistura fornece um potencial de oxidação insuficiente para desencadear modificações sensíveis na energia livre de superfície da poça de fusão, resultando em um comportamento hidrodinâmico semelhante a atmosfera com argônio puro.

5. CONCLUSÃO

A realização deste trabalho permitiu avaliar de forma quantitativa a influência da composição das atmosferas protetivas na geometria e na capacidade de espalhamento de cordões de solda executados pelo processo MIG/MAG automatizado. Diante dos resultados obtidos e das discussões fundamentadas na literatura, conclui-se que:

- A presença de dióxido de carbono (CO_2) na base inerte de argônio promoveu uma redução de 12% nos valores do ângulo de contato, confirmando a atuação desse gás ativo como um agente tensoativo.
- Embora o aumento gradativo do teor de dióxido de carbono não resulte em variações significativas na molhabilidade, a tendência observada de elevação no ângulo de contato sob concentrações mais elevadas de CO_2 evidencia a necessidade de estudos mais aprofundados para mapear o limite crítico a partir do qual a presença desse elemento passa a limitar os ganhos de molhabilidade;
- O grupo operado com a mistura de $\text{Ar} + 2\%\text{O}_2$ não apresentou melhorias na molhabilidade, mantendo o ângulo de contato em patamares equivalentes aos do gás puramente inerte (100% Ar). Esse comportamento evidencia a necessidade de investigar, em trabalhos futuros, misturas com teores progressivamente maiores de oxigênio para determinar o mínimo de concentração necessário para promover alterações na molhabilidade;

REFERÊNCIAS

- ATKINS, P.; PAULA, J. **Físico-Química**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- CASSIE, A. B. D.; BAXTER, S. **Wettability of Porous Surfaces**. Trans. Faraday Soc., n. 40, p. 546 3551, 1944.
- COSTA, Maria Celeste Monteiro de Souza. **Fenômenos de Instabilidade do Arco na Soldagem GMAW com Gases de Baixo Potencial de Oxidação**. 2006. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.
- CUNHA, Rosana Rocha; FERREIRA, Angela de Mello; SILVA, Aline Geice Vitor; JESUS, Magnum Augusto Moraes Lopes de. **Estudo da deposição de filmes finos de TiO₂ por sol-gel e evaporação E-beam**. In: **CONGRESSO ANUAL DA ABM, 70., 2015. Anais [...]** São Paulo: ABM, 2017
- EASTERLING, Kenneth E. **Introduction to the Physical Metallurgy of Welding**. 2. ed. Oxford: Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 1992.
- FREAR, D. R.; KINSMAN, K. R.; JONES, Wendell B. **Solder Mechanics: A State of the Art Assessment**. United States: Minerals, Metals & Materials Society, 1991.
- FORTES, Cleber; VAZ, Cláudio T. **Apostila Soldagem MIG/MAG**. ESAB BR. [S.l.], p. 33. 2005.
- HEIPER, C.R. & ROPER, J.R. (1982) **Mechanism for minor element effect on GTA fusion zone geometry**. Welding Journal.
- KOU, S. **Welding Metallurgy**. 2. ed. New Jersey: Wiley-Interscience, 2003.
- KUBIAK, K. J. et al. **Wettability versus roughness of engineering surfaces**. Wear, [S. l.], v. 271, n. 3-4, p. 523-528, 2011.
- MATEUS, Lucca. **Influência da rugosidade superficial na molhabilidade do cordão de solda no processo MIG/MAG**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2023.
- MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, A. S. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.

MOURA, E. A. D. M. et al. **Efeito do material de adição, do gás de proteção e do tectimento sobre a molhabilidade dos cordões de solda usando o processo MIG/MAG.** In: CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, 44. (CONSOLDA), 2018, Uberlândia. Anais [...]. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem.

NIZ, Weslei Rodrigues. **Influência da taxa de subida da corrente na regularidade do processo MIG/MAG por curto-circuito.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2023.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor aplicação.** São Paulo: Artliber, 2008.

TRINH, Q. N. et al. **Effect of oxygen in shielding gas on weldability in plasma-GMA hybrid welding process of high-tensile strength steel.** Journal of Materials Research and Technology, [S. l.], v. 31, p. 1-15, jul. 2024.

WENZEL, R. N. **Resistance of solid surfaces to wetting by water.** Industrial and Engineering Chemistry, v. 28, n. 8, p. 988-994, 1936.

ZANCAN, P. H. **Influência dos parâmetros de deposição na molhabilidade de filmes de a-C:H.** 2017. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2017.

ZILIO, Gabriel B. et al. **Influência do gás de proteção e condições de soldagem na diluição e molhabilidade de cordões de solda de aço inoxidável e liga de níquel depositados pelo processo MIG/MAG.** VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, 10/15 ago. 2014.

APÊNDICE

Apêndice A - Medições de todos os ângulos de contato

Amostra	Sub amostra	Ângulo de contato (°)
1	1.1	41,63
	1.2	42,94
	1.3	41,14
2	2.1	40,97
	2.2	43,76
	2.3	44,42
3	3.1	39,93
	3.2	43,02
	3.3	42,55
4	4.1	37,24
	4.2	39,60
	4.3	40,32
5	5.1	35,31
	5.2	37,26
	5.3	35,22
6	6.1	36,30

	6.2	35,75
	6.3	35,51
7	7.1	38,00
	7.2	34,10
	7.3	39,91
8	8.1	35,34
	8.2	37,89
	8.3	40,19
9	9.1	38,60
	9.2	39,12
	9.3	37,99
10	10.1	40,00
	10.2	38,78
	10.3	36,87
11	11.1	39,94
	11.2	41,30
	11.3	37,24
12	12.1	40,79
	12.2	38,49
	12.3	36,18

13	13.1	43,21
	13.2	40,16
	13.3	41,78
14	14.1	41,79
	14.2	42,53
	14.3	41,23
15	15.1	40,80
	15.2	41,10
	15.3	47,28
16	16.1	37,24
	16.2	39,84
	16.3	40,56
17	17.1	39,40
	17.2	33,88
	17.3	38,92
18	18.1	38,92
	18.2	37,64
	18.3	36,36