



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO (CTC)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Giulia Ciacci Zanella

Estudo do processo MIG/MAG visando aplicações automatizadas para recuperação de estruturas degradadas por corrosão em locais de difícil acesso

Florianópolis

2025

Giulia Ciacci Zanella

Estudo do processo MIG/MAG visando aplicações automatizadas para recuperação de estruturas degradadas por corrosão em locais de difícil acesso

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Mateus Barancelli Schwedersky, Dr

Coorientador: Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva Dr.

Florianópolis

2025

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Zanella, Giulia Ciacci

Estudo do processo MIG/MAG visando aplicações automatizadas para recuperação de estruturas degradadas por corrosão em locais de difícil acesso / Giulia Ciacci Zanella ; orientador, Mateus Barancelli Schwedersky, coorientador, Régis Henrique Gonçalves e Silva , 2025.
103 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. soldagem MIG/MAG. 3. soldagem de reparo. 4. superfícies degradadas. 5. gases de proteção. I. Schwedersky, Mateus Barancelli . II. Silva , Régis Henrique Gonçalves e . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Giulia Ciacci Zanella

Estudo de tecnologias de soldagem MIG/MAG visando aplicações automatizadas para recuperação de estruturas offshore degradadas por corrosão em locais de difícil acesso

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Eng. Mateus Barancelli Schwedersky
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Eng. Ruham Pablo Reis
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Eng. Tiago Vieira da Cunha
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Prof. Dr. Eng. Henrique Simas
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Dr. Eng. Mateus Barancelli Schwedersky
Orientador

Florianópolis, 2025.

Dedico,

Aos meus pais, Eraldo e Janice.

Aos meus irmãos, Giovana e Lorenzo.

Ao meu companheiro de vida, Pietro.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha gratidão aos meus pais, Janice e Eraldo, que sempre me incentivaram e não mediram esforços para apoiar minha busca por conhecimento e novas oportunidades.

Aos meus irmãos, Giovana e Lorenzo, agradeço por terem sido fontes de companheirismo, diversão, paciência e empatia nos momentos em que mais precisei. Minha eterna gratidão por tudo que fizeram e continuam fazendo por mim.

Ao Pietro, por ser porto seguro, obrigada por acreditar, apoiar e me incentivar ao longo de todo esse processo. Sua presença foi fundamental para a conclusão desta etapa da minha formação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Mateus Barancelli Schwedersky, sou profundamente grata pela paciência, pelo auxílio constante, pelas contribuições técnicas e pelo incentivo inestimável. Sua orientação foi essencial para a finalização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva, meu coorientador, agradeço pela orientação e pelos ensinamentos ministrados ao longo do programa.

Aos meus grandes amigos do Labsolda, Pamela de Matos, Duván Sánchez Quintana, Cláudio Schaeffer e Thayse Francielle Peralta, obrigada pela amizade, pelo apoio e por todos os cafés. Vocês foram fundamentais para a realização deste trabalho e tornaram a experiência mais leve.

Aos colegas e amigos do LABSOLDA, que sempre estiveram dispostos a ajudar: Cléber Guedes, Daniel Galeazzi, Vitor Massao Nishi Ueta, Tiago de Siqueira Lima Marchione, Alberto Bonamigo, Rafael Horn, Fernando Costenaro, Marcelo Okuyama e Alex Sandro Pereira. Suas contribuições técnicas e experiências foram imprescindíveis para este trabalho e para minha jornada. Muito obrigada a todos!

Gostaria também de agradecer ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e à ANP pelo apoio financeiro que possibilitou a realização deste projeto.

Por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para a elaboração deste trabalho, deixo aqui meu mais sincero agradecimento. Cada um desempenhou um papel fundamental em minha vida e formação, especialmente ao longo dos últimos dois anos. Muito obrigada!

RESUMO

As estruturas offshore estão sujeitas à perda de espessura por corrosão, devido ao ambiente agressivo em que se encontram. A recuperação de superfícies e o preenchimento de cavidades geralmente são realizados manualmente por uma equipe de soldadores, o que apresenta diversos desafios técnicos e econômicos. Em busca de soluções mais eficientes, operações robotizadas têm sido exploradas. O processo MIG/MAG convencional destaca-se como uma opção promissora por sua robustez, baixo aporte térmico, elevada taxa de deposição de material e facilidade de automatização. No entanto, a irregularidade das superfícies e o posicionamento das áreas a serem reparadas nem sempre são compensados pela trajetória do braço robótico, gerando desafios adicionais, como a formação de respingos. Em aplicações remotas, esses fatores podem comprometer a qualidade da solda e até causar entupimento do bocal de gás. Além disso, a corrosão das superfícies dificulta a execução dos procedimentos de preparação e limpeza, devido às limitações de peso e capacidade dos sistemas robóticos. Para enfrentar essas questões, este estudo avaliou o desempenho do processo MIG/MAG, considerando a estabilidade do arco e a qualidade do cordão em diferentes níveis de oxidação superficial. Foram analisados ainda os efeitos do uso de arames com diferentes diâmetros, a dinâmica da corrente no curto-circuito e a influência de misturas gasosas com teores variados de CO₂ e O₂. Métodos específicos de cálculo das taxas de corrente ao longo do ciclo de soldagem foram aplicados para avaliar o impacto na estabilidade operacional. Os resultados indicaram que, apesar dos desafios envolvidos nos reparos remotos, o processo MIG/MAG convencional é eficaz para a deposição de material, especialmente quando a escolha da mistura gasosa e os parâmetros de soldagem são otimizados. Em superfícies degradadas, observou-se que impurezas reagem com o metal líquido e com o gás de proteção, formando óxidos de silício e manganês em maior quantidade do que em superfícies limpas. Esses óxidos comprometeram a aderência dos cordões, sendo os principais fatores de falha a formação de óxidos e a distância entre os cordões. A mistura com 25% de CO₂ foi identificada como a opção mais adequada para essa aplicação, devido à sua maior eficácia na eliminação de impurezas e no favorecimento da aderência entre cordões.

Palavras-chave: soldagem MIG/MAG; soldagem de reparo; superfícies degradadas; gases de proteção.

ABSTRACT

Offshore structures are susceptible to thickness loss due to corrosion caused by the harsh environment they are exposed to. Surface recovery and cavity filling are typically performed manually by a team of welders, presenting various technical and economic challenges. In search of more efficient solutions, robotic operations have been explored. The conventional MIG/MAG process stands out as a promising option due to its robustness, low heat input, high material deposition rate, and ease of automation. However, surface irregularities and the positioning of the repair areas are not always adequately compensated by the robotic arm's trajectory, creating additional challenges, such as spatter formation. In remote applications, these factors can compromise weld quality and even lead to gas nozzle clogging. Moreover, surface corrosion makes it difficult to follow proper preparation and cleaning procedures due to the weight and capacity limitations of robotic systems. To address these challenges, this study evaluated the performance of the MIG/MAG process, focusing on arc stability and weld bead quality on surfaces with varying oxidation levels. The effects of using wires of different diameters, the suitability of welding power source dynamics, and the influence of shielding gas mixtures with varying CO₂ and O₂ content were also analyzed. Specific methods for calculating current variations throughout the welding cycle were applied to assess their impact on operational stability. The results showed that, despite the challenges of remote repairs, the conventional MIG/MAG process is effective for material deposition, particularly when the shielding gas mixture and welding parameters are optimized. On degraded surfaces, impurities were found to react with the molten metal and the shielding gas, forming silicon and manganese oxides in greater quantities than on clean surfaces. These oxides compromised bead adhesion, with oxide formation and the spacing between beads being the main factors of failure. The mixture containing 25% CO₂ was identified as the most suitable option for this application due to its greater effectiveness in removing impurities and promoting adhesion between beads.

Keywords: MIG/MAG welding; repair welding; deteriorated surface; welding gas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de <i>flare</i> tipicamente encontrado nas plataformas.....	17
Figura 2 - Mapa esquemático dos principais modos de transferência metálica em MIG/MAG, em função da corrente e da tensão.....	24
Figura 3 - Esquema da transferência metálica por curto-circuito convencional	25
Figura 4 - Oscilogramas de corrente (superior) e tensão (inferior) representativos da transferência metálica com CO ₂ com taxa de decrescimento da corrente de a) 20 A/ ms; b) 44A/ms, tensão regulada de 21 V e V _a = 3,5 m/min.....	27
Figura 5 - Oscilogramas de tensão, corrente e taxa de variação de corrente para o Arame AWS E70S6, 1,2mm com alimentação de 4m/min. Gás: Ar-4%CO ₂	27
Figura 6 - Diferença entre a tensão do arco em argônio puro e com pequenas adições de dióxido de carbono.....	32
Figura 7 - Taxa de deposição em função da corrente e do diâmetro do arame	35
Figura 8 - Comparação da Corrente Eficaz x Taxa de Fusão para arames com diferentes diâmetros	35
Figura 9 - Cordão com escória de óxido de silício.....	36
Figura 10 - Esquema da transferência metálica por curto-circuito controlado	38
Figura 11 - Recuperação automatizada de superfícies danificadas por cavitação	40
Figura 12 - Função de sobreposição criada e macrografia dos cordões soldados.....	41
Figura 13 - Função de sobreposição criada e macrografia dos cordões soldados com ajuste de -10% na distância entre centros.....	41
Figura 14 - Fluxograma ilustrativo da metodologia de ensaios e análises aplicados.....	42
Figura 15 – Bancada com o mangote com menor e maior condição de restrição	45
Figura 16 - Peças em extremo nível de degradação por corrosão	46
Figura 17 - Chapas produzidas com menor grau de oxidação	47
Figura 18 - Esquemático da metodologia de cálculo da taxa de corrente pelo SAP.....	49
Figura 19 - Representação esquemática da metodologia de cálculo da taxa de corrente pela linha de tendência	50
Figura 20 - Taxa instantânea de corrente plotada junto com a corrente e tensão em função do tempo	51
Figura 21 - Gráfico com os valores de taxa de corrente instantâneas acima do limiar calculado, acompanhados pelas curvas de tensão e corrente em função do tempo.....	52

Figura 22 - Representação esquemática dos cordões soldados e sentido de soldagem	53
Figura 23 - Exemplo de oscilograma sem abertura ajustada.....	54
Figura 24 - Cordões soldados sem abertura ajustada	54
Figura 25 - Oscilogramas a) aproximado da tensão; e b) da tensão e corrente de um cordão com abertura ajustada	55
Figura 26 - Esquema da metodologia de medição a) do tamanho de gota e b) <i>stick-out</i> visível	57
Figura 27 - Bancada final utilizada para os experimentos	59
Figura 28 - Bancada utilizada para filmagens de processo	59
Figura 29 - Resultados dos ensaios com curto-circuito convencional e controlado sinérgico	60
Figura 30 - Oscilogramas completos dos ensaios com $V_a = 3$ m/min com a) curto-circuito convencional e; b) controlado sinérgico.....	61
Figura 31 - Gráfico da alimentação de arame de 1,0 mm do ensaio com 1 volta no mangote	62
Figura 32 - Gráfico da alimentação de arame de 0,8 mm do ensaio com a) 1 e; b) 2 voltas no mangote.....	63
Figura 33 - Cordões soldados em peça com superfície extremamente oxidada e abertura do processo realizada na chapa limpa	64
Figura 34 - Cordões soldados em peças com superfície de degradação intermediária	64
Figura 35 - Cordão soldado em peça com superfície de degradação intermediária, buscando arrastar o arco aberto para regiões em pior condição superficial	65
Figura 36 - Cordões soldados em superfície oxidada com água	65
Figura 37 - Comparação entre os diferentes métodos de cálculo da taxa de corrente para o mesmo ciclo.....	66
Figura 38 - Comparação entre os diferentes métodos de cálculo da taxa de subida da corrente para 10 ciclos seguidos.....	67
Figura 39 - Comparação entre os diferentes métodos de cálculo da taxa de descida da corrente para 10 ciclos seguidos.....	67
Figura 40 - Gráficos da taxa instantânea de corrente para as diferentes condições ensaiadas.....	69

Figura 41 - Fotos dos <i>pads</i> logo após a soldagem com o tartilope e resultados de raio-x, a) 8% CO ₂ ; b) 25% CO ₂ e; c) 2%O ₂	70
Figura 42 - Gráfico com os valores de potência média de pico dos <i>pads</i> soldados em chapa limpa e chapa com superfície oxidada	73
Figura 43 - Gráfico de barras com os valores de <i>stick-out</i> visível medidos a partir das filmagens de alta velocidade.....	74
Figura 44 - Fotos dos <i>pads</i> logo após a soldagem com o robô, a) 8% CO ₂ ; b) 25% CO ₂ e; c) 2%O ₂	76
Figura 45 - Fotos dos <i>pads</i> logo após a soldagem com o robô com ajuste da distância entre centros, a) 8% CO ₂ ; b) 25% CO ₂ e; c) 2% O ₂	77
Figura 46 - Resultados de raio-x dos <i>pads</i> soldados com o robô em chapa limpa, a) 8% CO ₂ ; b) 25% CO ₂ e; c) 2%O ₂	78
Figura 47 - Resultados de macrografia da seção transversal dos <i>pads</i> em chapa limpa comparando a distância entre centros, a) 8%CO ₂ , b) 25%CO ₂ , e c) 2%O ₂	79
Figura 48 - Gráfico dos <i>pads</i> soldados em chapa limpa.....	81
Figura 49 - Foto dos <i>pads</i> logo após a soldagem com o robô e resultados de raio-x em chapa oxidada, a) 8% CO ₂ ; b) 25% CO ₂ e; c) 2% O ₂	82
Figura 50 - Resultados de macrografia da seção transversal dos <i>pads</i> em chapa oxidada	83
Figura 51 - Gráfico dos <i>pads</i> soldados em chapa limpa e oxidada	84
Figura 52 - Frames da filmagem com gás O ₂ evidenciando a ação da sílica no arco e poça de metal líquido (as setas apontam a presença de sílica)	85
Figura 53 - Frames da filmagem com gás 25%CO ₂ evidenciando movimentação da sílica na poça de metal líquido (as setas apontam a presença de sílica)	86
Figura 54 - Frames da filmagem com gás 25%CO ₂ mostrando a sílica sendo expulsa da poça metálica (as setas apontam a presença de sílica).....	86
Figura 55 - Frames da filmagem com gás O ₂ evidenciando a sílica que fica retida no "pé" do cordão. As setas apontam a presença de sílica na imagem.....	87
Figura 56 - Macrografia a seção transversal da primeira camada soldada com 8% de CO ₂ , destacando as inclusões de sílica	88
Figura 57 - Detalhamento de uma inclusão de sílica por MEV com ampliação de 250 x	88
Figura 58 - Detalhamento de uma inclusão de sílica por MEV com ampliação de 25,0 kx	89

Figura 59 - Detalhamento de uma inclusão de sílica a) no MEV e; b) câmera fotográfica	90
Figura 60 - Macrografia da seção transversal do <i>pad</i> soldado com 8% de CO ₂ sobre chapa oxidada, destacando grande inclusão de sílica	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades dos gases de proteção	29
Tabela 2 - Parâmetros utilizados no conjunto de ensaios.....	44
Tabela 3 - Parâmetros medidos para os ensaios com arame 0,8 mm	45
Tabela 4 - Parâmetros medidos para os ensaios com arame 1,0 mm	45
Tabela 6 - Parâmetros utilizados para soldagem dos <i>pads</i>	55
Tabela 7 - Especificação da composição química das chapas (%).....	57
Tabela 8 - Especificação da composição química dos arames (%).....	57
Tabela 9 - Valores das correntes de soldagem chapa limpa.....	71
Tabela 10 - Valores das correntes de soldagem chapa oxidada.	72
Tabela 11 - Valores das taxas de subida da corrente de soldagem em A/ms	73
Tabela 12 - Valores das taxas de descida da corrente de soldagem A/ms	74
Tabela 13 - Tamanho de gota medido a partir das filmagens de alta velocidade.....	75
Tabela 14 - Composição química medida na superfície dos <i>pads</i> soldados em chapa limpa.....	91
Tabela 15 - Composição química medida na superfície dos <i>pads</i> soldados em chapa oxidada	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MIG - Metal Inert Gas
MAG - Metal Active Gas
CMT - Cold Metal Transfer
CCC - Curto-circuito Controlado
DBCP - Distância Bico de Contato – Peça
GMAW - Gas Metal Arc Welding
IIW - Instituto Internacional de Soldagem
Ls - Indutância de Subida
Ld - Indutância de Descida
Lr - Indutância de Referência
SAP - Sistema de Aquisição Portátil
AWS - American Welding Society
SAW – Submerged Arc Welding
FCAW - Flux Cored Arc Welding
STT - Surface Tension Transfer
RMD - Regulated Metal Deposition
Va - Velocidade de Alimentação de Arame
ASTM - American Society for Testing and Materials
Ip - Picos de Corrente
Ds - Derivada de Subida da Corrente
Dd - Derivada de Descida da Corrente
MO - Microscópio Óptico
MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura
EDS - Espectroscopia de Dispersão de Energia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVO GERAL.....	20
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	SOLDAGEM MIG/MAG CONVENCIONAL.....	22
2.2	CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DE FONTES.....	26
2.3	GASES DE SOLDAGEM	28
2.4	ARAMES DE SOLDAGEM.....	34
2.5	CURTO-CIRCUITO CONTROLADO	36
2.6	CORROSÃO E PREPARAÇÃO SUPERFICIAL NA SOLDAGEM	38
2.7	SOBREPOSIÇÃO DE CORDÕES	39
3	MÉTODOS, EQUIPAMENTOS E MATERIAIS	42
3.1	MÉTODOS	42
3.1.1	Experimentação de variantes MIG/MAG	43
3.1.1.1	<i>Seleção da variante MIG/MAG que mantém regularidade em grandes variações geométricas.....</i>	43
3.1.1.2	<i>Análise da alimentabilidade de arames.....</i>	44
3.1.2	Experimentação com superfícies oxidadas.....	46
3.1.3	Dinâmica de corrente no curto-circuito.....	47
3.1.3.1	<i>Cálculo da taxa de corrente com o Sistema de Aquisição de Dados Portátil.....</i>	48
3.1.3.2	<i>Cálculo baseado na linha de tendência e média de derivadas de 10 pontos</i>	49
3.1.3.3	<i>Cálculo baseada em médias de derivadas.....</i>	50
3.1.4	Estudo sobre o gás de proteção em procedimentos de deposição com arame 0,8 mm	52
3.1.4.1	<i>Soldagem Robô Antropomórfico</i>	52
3.1.4.2	<i>Medições e análises.....</i>	56
3.2	MATERIAIS	57
3.3	EQUIPAMENTOS	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1	VARIANTES DO MIG/MAG E ARAMES	60
4.1.1	Avaliação da alimentabilidade de arames de 0,8 e 1,0 mm.....	61
4.2	SOLDAGEM EM SUPERFÍCIES OXIDADAS	63

4.3	ANÁLISE DE METODOLOGIAS DE CÁLCULO DE VARIAÇÃO DE TAXA DE CORRENTE.....	66
4.4	DEPOSIÇÃO DE CAMADAS COM ARAME DE 0,8 MM E DIFERENTES GASES.....	69
4.4.1	Soldagem com Tartilope	69
4.4.2	Soldagem Robô Antropomórfico.....	71
4.4.2.1	<i>Análise Visual.....</i>	75
4.4.2.2	<i>Resultados de soldagem em chapas oxidadas</i>	81
4.4.2.3	<i>Resultados de MEV e EDS.....</i>	87
4.4.2.4	<i>Análise de composição química da superfície dos pads.....</i>	90
5	CONCLUSÃO.....	92
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	93

1 INTRODUÇÃO

Conhecido por sua abundância e diversidade de recursos energéticos, o Brasil vem conquistando maior protagonismo na indústria global de exploração e produção de petróleo e gás. Um levantamento da Global Data prevê que o Brasil representará 23% da produção mundial de petróleo offshore nos próximos dois anos, chegando a 1,16 milhões de barris por dia (CORRÊA, 2023). A crescente competitividade nesse setor exige maior fiscalização e atenção às possíveis perdas. Atualmente a indústria continua enfrentando desafios, com paradas previstas de manutenção e imprevistas devido a falhas mecânicas em estruturas offshore, ocasionadas em grande parte por corrosão, resultando em perdas monetárias significativas e oferecendo risco à mão de obra (KAIROS,2022).

Reparos em oleodutos, gasodutos e estruturas de navios plataforma são críticos, pois representam alto risco aos operadores, seja devido à elevada temperatura, natureza insalubre ou classificação de espaço confinado. Um exemplo de reparo crítico é o da estrutura alta treliçada que sustenta o *Flare*, um sistema de proteção responsável por queimar gases em excesso para aliviar a pressão e reduzir o risco de explosões (MANCO et al., 2022; YOUSEFI; FARGHADIN; FARZADI, 2015), mostrado na Figura 1. Deve-se considerar também a curta janela de tempo disponível aos operadores, uma vez que alguns locais não podem ser acessados por humanos sem interromper as atividades da plataforma. De acordo com a empresa Rio Analytics, uma parada de uma semana para manutenção tem uma perda estimada de US\$7 milhões, portanto cada momento em que a plataforma está fora de funcionamento resulta em impactos diretos nos custos operacionais.

Figura 1 - Modelo de *flare* tipicamente encontrado nas plataformas



Fonte: <https://petronoticias.com.br/>

A confiabilidade estrutural desse equipamento é essencial devido ao impacto ambiental envolvido, já que o gás natural enviado ao *flare* possui um efeito nocivo maior do que os gases gerados pela queima. A queima preventiva causa aquecimento localizado que, combinado com condições climáticas extremas e reações químicas presentes, intensifica o desgaste corrosivo. Isso resulta na perda de espessura e compromete a integridade da estrutura, afetando sua funcionalidade. O processo de manutenção, nesse contexto, começaria com uma limpeza superficial para remover corrosão e contaminantes da área a ser reparada, preferencialmente por desgaste mecânico. Em seguida, seria realizada a deposição de material por soldagem para recuperar a espessura perdida, garantindo a confiabilidade estrutural e a estanqueidade do sistema. Por fim, o reparo seria revestido com tinta para prolongar o tempo entre manutenções e proteger o metal depositado das condições climáticas adversas.

Para enfrentar os desafios desse tipo de manutenção, vem sendo incentivado o desenvolvimento e a implementação de sistemas robóticos para inspeção e reparo. Esses sistemas visam aumentar a segurança dos operadores e possibilitar a realização da manutenção sem a necessidade de interrupção das atividades da plataforma.

Entre os diversos processos de soldagem disponíveis, o MIG/MAG destaca-se como uma alternativa promissora para a recuperação de espessura e reparo de defeitos. Trata-se de um processo robusto, com alta taxa de deposição de material e facilidade de automatização. No entanto, a aplicação remota e a longa distância trazem desafios que podem comprometer a operação.

Um dos principais desafios é manter constante a posição e a distância da tocha em relação à peça ao longo do processo, especialmente devido à irregularidade das cavidades a serem preenchidas. A trajetória programada para o braço robótico, responsável pela movimentação durante a soldagem remota, frequentemente não consegue compensar todas as variações do relevo superficial. Alterações abruptas na topografia podem gerar discrepâncias na velocidade relativa de alimentação do arame, desestabilizando o arco elétrico e resultando em maior quantidade de respingos, fusão do arame no bico de contato e formação de cordões descontínuos. Adicionalmente, nem todos os processos de soldagem são adequados para operações em qualquer posição. Isso se torna ainda mais desafiador ao realizar soldagem em uma estrutura tubular fixa, onde a impossibilidade de ajustar a peça torna a operação mais complexa. Por essas razões, é crucial selecionar um processo de soldagem que apresente baixo aporte térmico e seja capaz de lidar com as limitações impostas por condições de soldagem fora de posição.

Dentro do processo MIG/MAG, existem variações que podem ser prontamente aplicadas. Uma delas é a versão convencional com transferência metálica por curto-circuito, que oferece menor aporte térmico e possibilita soldagem fora de posição. No entanto, essa modalidade apresenta como desvantagem a geração de respingos e a acentuada oscilação e deformação da poça de fusão. A formação de respingos é uma característica inerente a algumas variantes do processo MIG/MAG, mesmo em operações bem parametrizadas e regulares. A gravidade desses respingos depende de outros fatores operacionais, como o tipo de gás de proteção utilizado, a limpeza superficial da peça e o diâmetro do arame. Esse aspecto representa uma preocupação adicional em aplicações críticas, podendo comprometer a qualidade da solda e até levar ao entupimento do bocal de gás.

Para mitigar essas características indesejáveis e ampliar as possibilidades de aplicação, foram desenvolvidas variações modernas do processo MIG/MAG. Uma dessas inovações é o CMT (Cold Metal Transfer), desenvolvido pela Fronius. Esse processo, além de controlar a forma da onda da corrente, regula a velocidade e o sentido de avanço do arame, proporcionando uma transferência metálica mais suave, estável e regular. Esse controle, conhecido como alimentação dinâmica, é realizado por um motor secundário integrado na tocha. O CMT tem grande aceitação em reparos devido ao maior controle geométrico do cordão e à capacidade de preencher gaps (DUTRA; SILVA; MARQUES, 2013). No entanto, a necessidade de incorporar mais um equipamento ao braço robótico pode limitar sua viabilidade, justificando a busca por alternativas mais simples.

Outras variantes do processo MIG/MAG, como o CCC (Curto-Circuito Controlado), eliminam a necessidade de equipamentos adicionais, enquanto mantêm o controle da transferência metálica, a estabilidade do arco, a redução de respingos e, conseqüentemente, maior repetibilidade e confiabilidade. O CCC utiliza a monitoração e modulação da corrente durante o ciclo de transferência, reduzindo a corrente e aplicando pulsos seletivos para promover uma transferência metálica regular e suavizar as oscilações da poça de fusão (GOHR JR, 2002; KINDERMANN, 2016).

Antes de realizar uma operação de soldagem, é imprescindível realizar a limpeza da superfície que será reparada. Manuais de soldagem recomendam procedimentos rigorosos para remover completamente óxidos, incrustações, revestimentos e umidade da área de trabalho. Contudo, em sistemas robotizados que operam remotamente em locais de difícil acesso, a necessidade de compactação e leveza do equipamento impõe desafios significativos. Essas limitações afetam a capacidade do manipulador robótico de carregar ferramentas pesadas no "end effector". A esmerilhadeira, frequentemente usada para preparação superficial, apresenta

um desafio adicional devido ao peso e à elevada força de reação durante o uso. Métodos alternativos, como o jateamento com abrasivos, são mais facilmente adaptáveis a sistemas robóticos, mas não garantem limpeza eficaz em superfícies altamente degradadas. Por outro lado, a soldagem em superfícies sem limpeza prévia é pouco estudada, e os impactos dessa prática ainda não são bem compreendidos, representando um campo aberto para novas investigações.

O presente trabalho aproveita o contexto do projeto institucional denominado JIP - ROBÔ ESCALADOR PARA PINTURA E SOLDAGEM que está sendo realizado pelo LABSOLDA/UFSC, e busca avaliar e estudar metodologias de deposição de material por soldagem para o reparo de superfícies em diferentes condições de oxidação, buscando investigar se diferentes misturas gasosas e técnicas de transferência metálica no processo MIG/MAG conseguem contribuir para mitigar o efeito negativo de uma superfície não ideal.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho é estudar e aprimorar o processo MIG/MAG utilizando arame de 0,8 mm, com foco na aplicação de reparo remoto de estruturas metálicas degradadas por corrosão. Busca-se otimizar a estabilidade do processo e a qualidade do reparo, avaliando também sua aplicabilidade em superfícies com condições ideais de limpeza e em superfícies com camada de oxidação.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atender o objetivo geral, foram listados os seguintes objetivos específicos:

- Experimentar duas variantes do processo MIG/MAG: o convencional, com comando de tensão, e o curto-circuito controlado (CCC), buscando comparar seu desempenho quando submetidos à variação de DBCP. Além de identificar as melhores condições de uso de cada variante, considerando a estabilidade do arco, a qualidade do cordão de solda e a facilidade de controle em ambientes remotos.
- Avaliar a possibilidade de soldagem com o processo MIG/MAG em superfícies com diferentes níveis de degradação, buscando entender como a condição da superfície influencia a abertura e a manutenção do arco elétrico, bem como a qualidade da solda resultante.

Isso permitirá a adaptação das estratégias de reparo conforme o nível de deterioração encontrado em ambientes remotos.

- Desenvolver e aplicar diferentes metodologias para calcular as taxas de subida e descida da corrente de soldagem durante o ciclo do processo MIG/MAG convencional, identificando qual método oferece maior precisão e consistência na estimativa das variações de corrente ao longo do processo.

- Analisar a influência de diferentes composições de gases de proteção—misturas de argônio com 8% CO₂, 25% CO₂ e 2% O₂—sobre a formação do cordão de solda e a estabilidade do processo, tanto em superfícies limpas quanto degradadas. A análise será focada em aspectos como regularidade geométrica, formação de sílica, porosidade, respingos e a interação entre o gás de proteção e os óxidos presentes nas superfícies degradadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão aborda os principais aspectos relacionados ao trabalho, explorando o processo de soldagem MIG/MAG e identificando os diferentes modos de transferência metálica e suas aplicações. São discutidas a regulagem da dinâmica de corrente na fonte de soldagem e as influências de diferentes configurações na estabilidade e na qualidade da solda. Também se analisa a influência dos gases de proteção e o papel que desempenham na estabilidade do processo e nas características metalúrgicas finais da soldagem. Além disso, são examinados os arames utilizados no processo e como sua interação com os gases de proteção pode resultar na formação de descontinuidades. No contexto do MIG/MAG, foi estudada a variante com modulação de corrente, o curto-circuito controlado, destacando suas vantagens em relação à operação convencional. Por fim, a revisão aborda questões relacionadas à preparação e à condição superficial para soldagem, bem como técnicas de sobreposição de cordões, que são fundamentais para a obtenção de soldas de alta qualidade em aplicações diversas.

2.1 SOLDAGEM MIG/MAG CONVENCIONAL

Quando comparado a outros processos de soldagem a arco, o MIG/MAG apresenta diversos benefícios, como maior velocidade de soldagem, ausência de escória sobre a peça de trabalho e a capacidade de soldar uma ampla variedade de materiais de diferentes espessuras (SISODIA; GÁSPÁR, 2022). Além disso, é um processo econômico e, por essa razão, é um dos mais utilizados na indústria para a fabricação de soldas de alta qualidade (KAH; LAYUS; NDIWE, 2022).

As primeiras fontes de soldagem convencionais, baseadas em arquitetura de controle analógico, possibilitavam o ajuste de apenas os valores de tensão e da velocidade de alimentação de arame, sendo a intensidade da corrente dependente das variáveis reguladas e das características da fonte. Com o passar dos anos, a constituição interna das fontes de soldagem evoluiu, e foram introduzidas estruturas eletrônicas baseadas em tiristores, que as tornaram mais robustas (KAH; SUORANTA; MARTIKAINEN, 2012). As fontes amplamente utilizadas pela indústria nos dias de hoje surgiram na década de 1980. Trata-se de fontes com inversores transistorizados, que possibilitam maior controle e tempos de resposta mais rápidos (DUTRA, 2023).

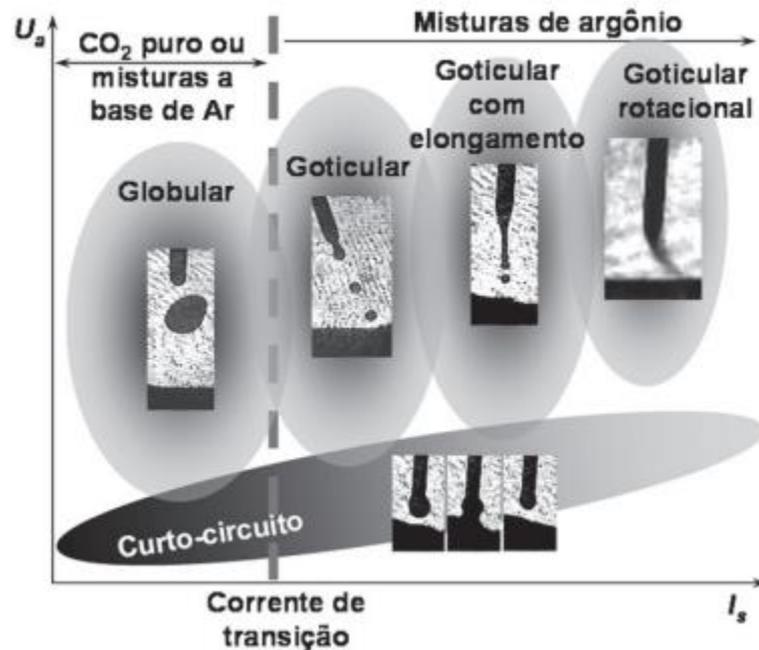
Um elemento de grande importância no processo de soldagem MIG/MAG é o gás de proteção, cuja função é criar e sustentar o ambiente de ionização necessário para a formação do arco, além de proteger os metais durante a transferência e a troca de fase. Originalmente, o processo foi patenteado para a soldagem em atmosfera inerte MIG (metal inert gas), sendo o hélio o gás protetor utilizado (DUTRA, 2023). O processo MAG (metal active gas), por outro lado, é caracterizado pela utilização de um gás ativo, como dióxido de carbono puro ou misturas de argônio com dióxido de carbono ou oxigênio. Para a soldagem de aço carbono, a utilização de um gás com componente ativo é imprescindível, e existem várias combinações possíveis de gases oxidantes, sendo as mais comuns as misturas de argônio com diferentes teores de dióxido de carbono.

A forma de transferência metálica no processo GMAW define suas características, aplicações e usabilidade. No processo MIG/MAG, essa transferência é fundamentalmente resultado da interação entre forças de origem eletromagnética, gravitacional e de tensão superficial, que são diretamente influenciadas pela composição química, pelo gás de proteção e pelos componentes elétricos, como tensão e corrente (NORRISH, 2024; GOHR JR, 2002).

A primeira classificação fenomenológica dos modos de transferência de metal foi produzida para o Instituto Internacional de Soldagem (IIW) em 1969 (NORRISH, 2024), utilizando filmagens em alta velocidade. Apesar de seu mérito, essa classificação não abrange os tipos de transferência controlada mais recentes nem os modos de transferência que só são reconhecíveis com tecnologias de medição avançadas. Scotti, Ponomarev e Lucas (2012) estudaram diferentes modos de transferência para caracterizá-los. A Figura 2 mostra um mapa esquemático e qualitativo dos principais modos de transferência metálica em MIG/MAG, em função da corrente e da tensão. Alguns autores classificam esses modos de transferência como naturais, pois não são forçados por parâmetros elétricos adicionais ou pelo controle de alimentação de arame (NORRISH, 2003; LUCAS; IORDACHESCU; PONOMAREV, 2005).

Basicamente, no processo MIG/MAG convencional, existem dois principais grupos de transferência metálica: com curto-circuito e sem curto-circuito. Os modos de transferência sem curto-circuito ocorrem em níveis de potência elevados, como no modo goticular, que oferece uma transferência uniforme e projetada de pequenas gotas. No entanto, esse modo ocorre apenas acima de um determinado valor de corrente, também chamada de corrente de transição, quando as forças eletromagnéticas são suficientemente fortes para superar a tensão superficial do material e projetá-lo.

Figura 2 - Mapa esquemático dos principais modos de transferência metálica em MIG/MAG, em função da corrente e da tensão

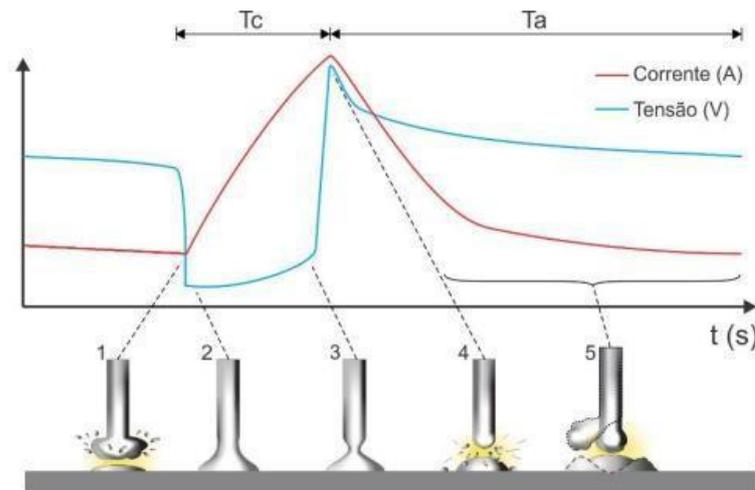


Fonte: Scotti, Ponomarev e Lucas (2012)

A corrente de transição varia de acordo com o diâmetro e a composição do arame, bem como com a mistura do gás de proteção. Para um arame sólido de aço carbono típico, com 1,2 mm de diâmetro e em uma mistura de gás de proteção de argônio com CO₂, a corrente de transição está em torno de 220 A (NORRISH, 2024). Acima dessa corrente, a transferência é uniforme, mas o aporte térmico pode ser excessivo ao soldar sobre chapas com espessura fina ou em posições que não sejam a plana. Abaixo dessa corrente, a transferência ocorre de forma globular, o que pode resultar em uma transferência menos controlada (KIM; EAGAR, 1993).

A transferência por curto-circuito opera com correntes abaixo da corrente de transição, promovendo um menor aporte térmico (*heat input*). No entanto, um modo de transferência por curto-circuito estável exige um ajuste fino cuidadoso dos parâmetros de soldagem, pois esse modo é caracterizado pelo contato entre a gota metálica líquida, ainda ligada ao arame-eletrodo, e a poça de fusão. Isso ocorre porque as forças eletromagnéticas, nesse caso, não têm energia suficiente para expulsar a gota formada (SILVA; DUTRA, 2007). Na Figura 3 está ilustrado o mecanismo de transferência de gotas por curto-circuito convencional, que exemplifica a sequência do processo durante a formação e o desprendimento das gotas metálicas.

Figura 3 - Esquema da transferência metálica por curto-circuito convencional



Adaptado de: Direne (2014)

Após o contato da gota com a poça metálica (Figura 3 (1)), o metal líquido, proveniente da fusão do arame eletrodo, começa a se restringir e forma o que é conhecido como ponte metálica. Esse fluxo de metal líquido é sujeito aos efeitos das forças eletromagnéticas, que o comprimem e formam uma região com diâmetro reduzido, efeito conhecido como *Pinch* (Figura 3 (3)). Esse efeito é proporcional ao quadrado da corrente e torna-se maior quanto menor for o raio do condutor (SILVA, 2006). Além do efeito *Pinch*, existe a tensão superficial, que é diretamente influenciada pela composição química do material, pelo gás de proteção e pela temperatura, atuando nesse momento. Todos esses efeitos se combinam para que ocorra a ruptura da ponte metálica, caracterizando a transferência metálica da gota. Dando sequência ao ciclo, o arco é reestabelecido, e uma nova gota começa a se formar na ponta do eletrodo. Uma desvantagem desse modo de transferência é que a ruptura da ponte metálica ocorre em um momento em que a corrente está com valor elevado, gerando uma transferência com grande instabilidade, caracterizada pela formação de respingos, oscilação e deformação da poça de fusão, além de micro explosões (DIRENE, 2014; SILVA, 2006).

O processo de soldagem MIG/MAG se destaca como uma opção atrativa em comparação a outros métodos, devido à sua elevada produtividade, proporcionada pela natureza semiautomática, versatilidade, alta taxa de deposição de material, facilidade de automação e boa qualidade do resultado final, podendo ser adequadamente aplicado na montagem de componentes que exigem alta capacidade de carga. Além de permitir a soldagem em várias posições e minimizar o aporte térmico (SCOTTI; PONOMAREV, 2014; GALEAZZI et al., 2022).

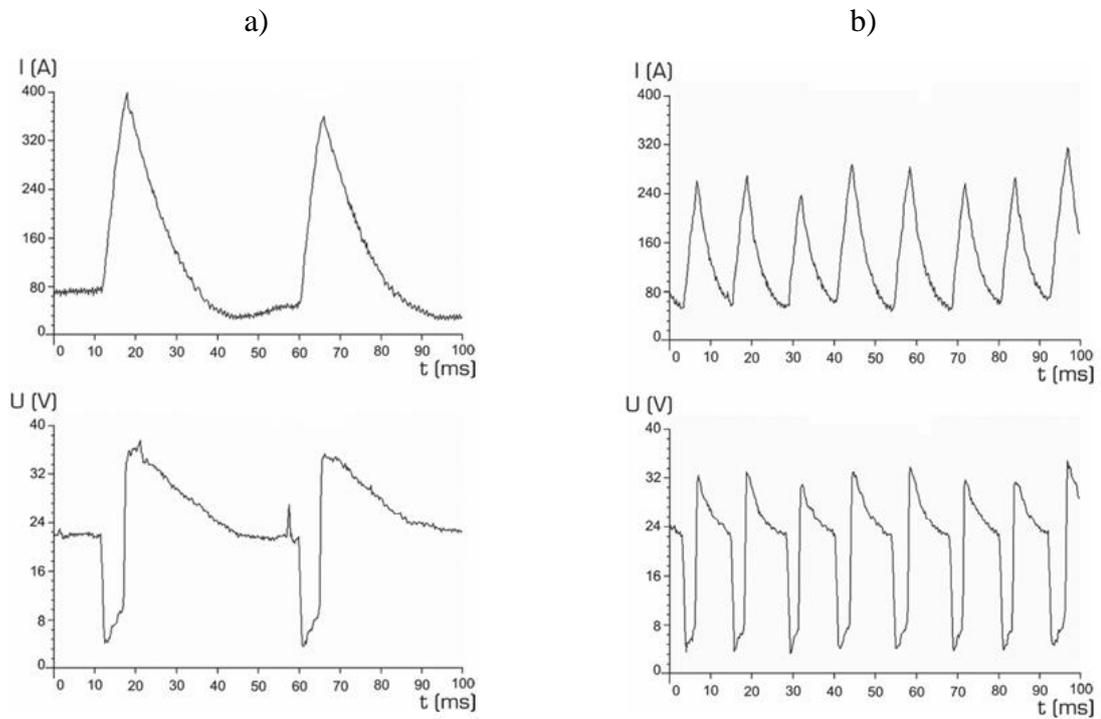
2.2 CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DE FONTES

Os avanços tecnológicos em fontes de soldagem têm desempenhado um papel crucial na superação das limitações dos processos convencionais, proporcionando maior controle sobre as oscilações elétricas e aprimorando tanto a estabilidade quanto a qualidade das soldas. No entanto, esses controles relacionados à dinâmica do arco não podem ser avaliados por meio de instrumentos simples, como amperímetros e voltímetros. Para medir essas características dinâmicas, é necessário o uso de osciloscópios ou dispositivos capazes de relacionar variáveis com o tempo, além da aplicação de metodologias específicas de cálculo para sua determinação (GOHR JR., 2002; SILVA et al., 2024).

Em fontes de soldagem modernas, como por exemplo as fontes Digitex e Digiplus da empresa IMC, a regulação da indutância, que controla a taxa de variação da corrente (di/dt), é ajustada por meio de parâmetros como a indutância de subida (L_s) e de descida (L_d), baseados na indutância de referência (L_r) do IGBT e nos divisores de subida (K_s) e de queda (K_d). Esses valores podem ser programados numa escala de 1 a 600, permitindo ajustes em tempo real, o que melhora a estabilidade do processo e a eficiência da taxa de deposição (GOHR JR., 2002).

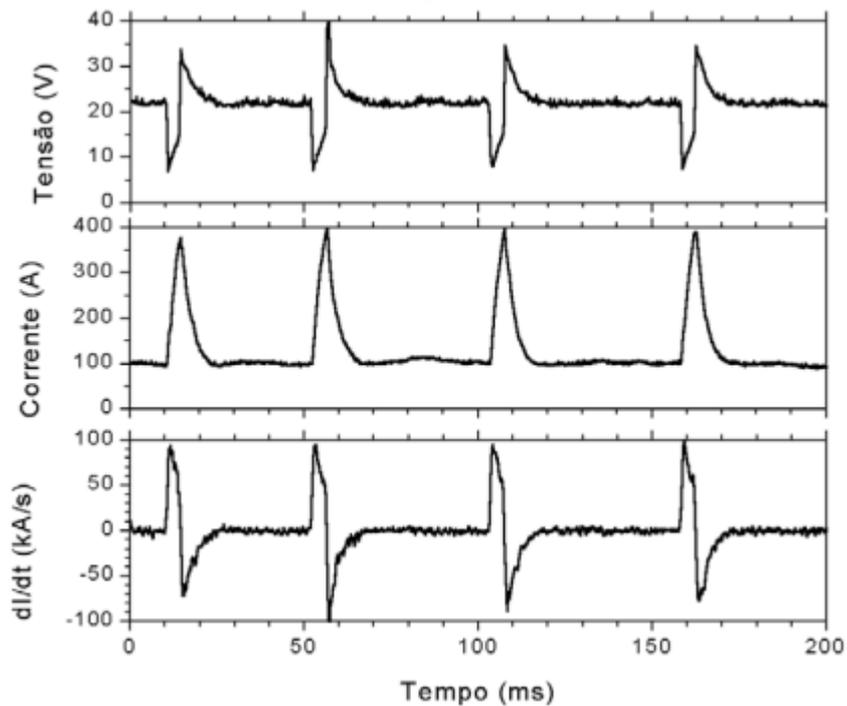
Pesquisas focadas na influência da indutância na corrente de soldagem, como a de Díaz, Camus e Cunha (2020), mostram que a variação da corrente afeta a estabilidade da transferência de metal, a geometria do cordão de solda e a geração de respingos. Dutra (2008) também estudou a influência da taxa de corrente na soldagem com CO_2 puro, destacando que, a instabilidade associada a soldagem com esse gás pode ser corrigida com ajustes da taxa de variação da corrente. O autor afirma que durante a fase de curto-circuito, a taxa de variação da corrente não influencia significativamente a qualidade da solda com diferentes gases. Entretanto, a taxa de decrescimento da corrente durante a recuperação do arco é crítica e deve ser ajustada para cada tipo de gás. Com base na regularidade da aparência das soldas, que tem correlação direta com a frequência de destacamento e suavidade da transferência metálica, o autor encontrou que a melhor condição foi obtida com uma taxa de descida de 20 A/ms. A Figura 4 traz os oscilogramas de corrente e tensão para diferentes taxas utilizadas. O autor concluiu que, independentemente da situação, a taxa de subida da corrente não deve ser inferior a 50 A/ms para garantir uma soldagem estável e eficiente. Esses ajustes na taxa de variação da corrente são fundamentais para otimizar a qualidade da solda e minimizar a ocorrência de respingos (DUTRA, 2008)

Figura 4 - Oscilogramas de corrente (superior) e tensão (inferior) representativos da transferência metálica com CO₂ com taxa de decrescimento da corrente de a) 20 A/ ms; b) 44A/ms, tensão regulada de 21 V e V_a= 3,5 m/min



Adaptado de: Dutra (2008)

Figura 5 - Oscilogramas de tensão, corrente e taxa de variação de corrente para o Arame AWS E70S6, 1,2mm com alimentação de 4m/min. Gás: Ar-4%CO₂



Adaptado de: Modenesi (2009)

No trabalho apresentado anteriormente, a taxa de variação de corrente foi calculada utilizando um recurso do Sistema de Medição Portátil (SAP), que emprega três pontos do oscilograma de corrente para determinar uma inclinação representativa da taxa de variação. Esse método será detalhadamente explicado na seção de metodologia deste estudo. Por outro lado, o trabalho de Modenesi (2009) propõe uma abordagem distinta para a apresentação da taxa de variação de corrente. Os oscilogramas apresentados pelo autor, reproduzidos na Figura 5, representam a taxa de corrente, junto com a corrente e tensão instantâneas, por meio de gráficos plotados. Essa forma de representação também será utilizada neste trabalho como uma ferramenta para caracterizar o comportamento da taxa ao longo do ciclo de transferência metálica.

2.3 GASES DE SOLDAGEM

O processo MIG/MAG requer um fluxo constante de gás em torno do metal de base e eletrodo para proteção do metal líquido das gotas e poça de fusão. Além da proteção, o gás também desempenha um papel crucial na estabilização do arco elétrico, e no controle da transferência metálica, influenciando diretamente a geometria do cordão de solda, as propriedades mecânicas e as características metalúrgicas da solda final.

A Tabela 1 apresenta as propriedades dos gases mais utilizados na soldagem. Tanto a estabilidade do arco ao longo do processo quanto a facilidade de ignição do arco são fortemente influenciadas pelo potencial de ionização do gás, que representa a energia (em eV) necessária para ionizar o gás e permitir a condução de corrente elétrica. Por esse motivo, processos que utilizam argônio como principal gás de soldagem tendem a apresentar maior facilidade na abertura do arco em comparação com operações que utilizam hélio (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

Os gases de proteção, especialmente os gases ativos, têm um comportamento reativo com o metal de solda devido à sua natureza. Os gases ativos utilizados na soldagem, apresentam reatividade controlada, essencial para a estabilização do arco, e podem ser usados puros ou mais frequentemente em misturas com gases inertes. Essa reatividade controlada é importante, pois um teor elevado de oxidação pode ser prejudicial, podendo levar a oxidação excessiva do material soldado levando a formação excessiva de óxidos, porosidade e respingos. Por essa razão, materiais mais reativos, como alumínio e titânio, são geralmente soldados com gases inertes (como o argônio). Esses materiais não necessitam do auxílio de um gás na estabilização do arco devido à camada de óxido que se forma naturalmente sobre a poça de fusão. Por outro

lado, metais menos reativos, como os aços, necessitam de gases com um potencial de oxidação para estabilizar o arco sobre a poça de fusão. Assim, a escolha do gás de proteção e seu comportamento em relação ao metal é um fator crucial para a qualidade final da solda (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

Tabela 1 - Propriedades dos gases de proteção

Gás	Símbolo químico	Peso molecular	D (kg/m ³)	PI (eV)	CT (mW/m.K)	Cv (kJ/kg°C)
Argônio	Ar	39,9	1,78	15,8	16,4	0,314
Dióxido de Carbono	CO ₂	44,0	1,98	14,4	14,7	0,657
Hélio	He	4,0	0,18	24,6	142,6	3,11
Hidrogênio	H ₂	2,1	0,07	13,5	168,3	10,17
Nitrogênio	N ₂	28,0	1,16	14,5	24,0	0,742
Oxigênio	O ₂	32,0	1,33	13,2	24,2	0,653

D= densidade do gás medida à 0 °C e 1 atm (densidade do ar atmosférico =1,2); PI= potencial de ionização; Cv= capacidade específica de calor a volume constante, medida à 21,1 °C e 1 atm; CT= condutividade térmica, medida à 0 °C e 1 atm

Fonte: Scotti e Ponomarev (2008)

Para a soldagem de aço carbono no processo MIG/MAG, os gases mais utilizados são misturas baseadas em argônio e CO₂, com percentuais que variam de 2 a 100% de CO₂, garantindo um arco de fácil abertura, quente e estável. A adição de CO₂ ao argônio altera a característica corrente-tensão do arco, resultando em um aumento na frequência de transferência metálica (ZIELINSKA et al., 2008).

Gases de proteção formados por moléculas de dois ou mais átomos, como CO₂ e O₂, vão ser dissociados devido à alta temperatura do arco, e somente após a dissociação eles serão ionizados. A energia necessária tanto para dissociar essas moléculas quanto para ionizá-las é maior, caracterizando os arcos gerados a partir desses gases moleculares como "arcos quentes". Durante o processo, o CO₂ se dissocia em CO e ½ O₂, como apresentado nas Equações 1 e 2, exigindo maior tensão para manter o arco aberto, e conseqüentemente aumentando o potencial de energia, o que eleva a densidade de corrente. Essa maior tensão deve ser considerada na parametrização, pois pode gerar um arco muito curto.



Nesse contexto, o potencial de oxidação dos gases também influencia a tensão superficial entre o metal fundido e o ambiente, o que afeta o tamanho de gota e duração do curto circuito, e pode ser prejudicial para a estabilidade. A maioria dos estudos reforça que o uso de misturas com maior concentração de dióxido de carbono fornece mais calor à poça de fusão, afetando o fluxo convectivo do metal líquido na poça, o que aumenta a molhabilidade do cordão de solda e reduz a altura do reforço (RHEE; KANNATEY-ASIBU, 1991; DUTRA, 2023; JONSSON; MURPHY; SZEKELY, 1995). Outros resultados corroboram essas afirmações, indicando que, devido à maior temperatura da poça de fusão provocada pelo maior teor de CO₂, as geometrias das peças produzidas por Manufatura Aditiva por Deposição de Arco foram dimensionalmente menos precisas do que as produzidas com teores mais baixos de CO₂. Silwal *et al.* (2020) encontrou que ao soldar com aço baixo carbono, uma mistura de 5% CO₂ e 95% Ar foi o gás de proteção ideal para reduzir as temperaturas do processo e melhorar as propriedades mecânicas.

A mistura gasosa ideal vai depender da aplicação desejada. O potencial de oxidação do CO₂ contribui para a estabilidade do arco, formando óxidos que diminuem o movimento do arco (pontos de cátodo) e favorecem a transferência metálica por curto-circuito. Alguns autores indicam o uso de CO₂ puro como gás de proteção (KAH *et al.*, 2022). Por outro lado, estudos sobre soldagem com MIG/MAG convencional utilizando misturas de CO₂ + Ar mostraram que o aumento do teor de CO₂ deteriora a regularidade da transferência metálica, levando à geração excessiva de respingos e à aparência irregular do cordão. No entanto, esse aumento também melhora a penetração e a área de fusão dos cordões de solda, além de reduzir a convexidade do cordão. De modo geral, conclui-se que o teor de CO₂ não deve ser inferior a 10% (exceto para chapas de espessura fina) nem superior a 30%, garantindo parâmetros geométricos e aparência adequados do cordão de solda, além de manter uma taxa de respingos aceitável (LISKEVYCH; SCOTTI, 2014).

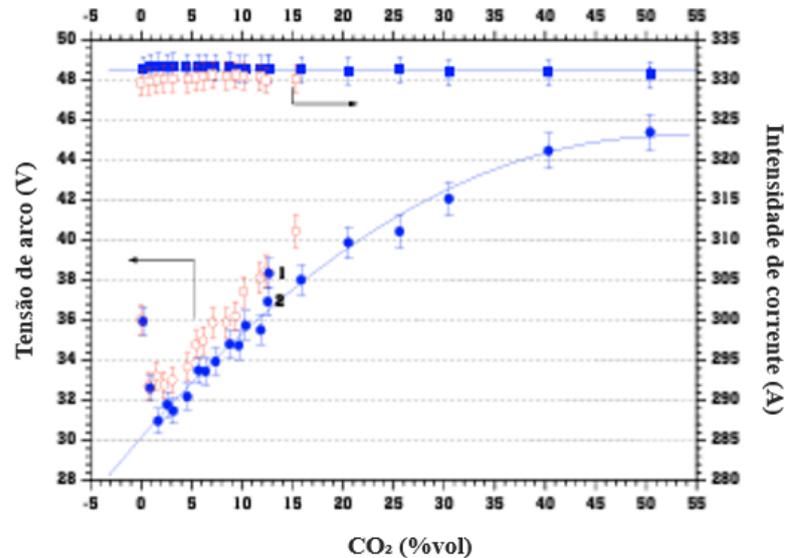
As deposições por soldagem com CO₂ puro são caracterizadas por uma penetração de raiz bastante arredondada e rasa. A sua mistura em grande quantidade com o argônio resulta em uma força do arco mais alta e, conseqüentemente, a uma penetração mais profunda. Para a mesma intensidade de corrente, essa força aumenta com a diminuição do comprimento do arco. Quando argônio puro ou argônio misturado com O₂ é utilizado, a raiz produzida é profunda, porém mais estreita (MVOLA; KAH, 2016).

Durante o aquecimento do arame, uma quantidade significativa de vapor metálico é gerada e transportada pelo centro do arco. Pesquisas demonstraram que, em muitos casos, a concentração de vapor metálico na região do arco tem um efeito mais substancial nas

propriedades do arco e no transporte de material do que vários componentes do gás de proteção, como oxigênio, hidrogênio ou hélio. Isso é particularmente evidente nos modos de transferência goticular e pulsado (HERTEL et al., 2017). Zielinska et al (2008) observou que conforme a proporção de dióxido de carbono em relação ao argônio aumentou, maior a decomposição e vaporização de elementos de liga, o que perturba o desprendimento das gotas metálicas, provocando dificuldades ao soldar com a transferência por vôo livre. Essa perturbação foi registrada com concentrações de CO₂ entre 20 e 30%, quando as gotas começam a ser repelidas e perdem a sua geometria esférica (SODERSTROM; MENDEZ, 2008). Outros estudos também apontam que para esse modo de transferência, uma mistura com menos potencial de oxidação produz um arco mais estável (SUBAN; TUŁEK, 2003; KAH et al., 2022). Ao explorar melhor a soldagem nesse modo de transferência usando gases de baixo potencial oxidante, alguns autores visualizaram que a instabilidade está associada com o período de pico de tensão onde a altura do arco variou significativamente e a transferência metálica foi prejudicada sendo caracterizada como globular repulsiva, com elevada geração de fumos (COSTA; STARLING; MODENESI, 2010).

Zielinska et al. (2008), ao soldar com corrente constante e transferência por voo livre, registraram um aumento gradual da tensão do arco e, conseqüentemente, da energia do arco com o aumento da concentração de CO₂ no gás de proteção, como apresentado na Figura 6. A diferença entre a tensão do arco para gás de proteção de argônio puro e para pequenas concentrações de CO₂ (menos de 3% em volume) é de até 3 V, o que sugere uma queda na resistência do plasma ou, então, uma maior facilidade de ionização. Os autores também analisaram a influência da adição progressiva de dióxido de carbono (de 0,8% a 1,5% em volume de CO₂) e concluíram que ocorre um alongamento insignificante do arco, o que, para uma taxa de alimentação de arame constante, parece indicar uma aceleração da fusão do arame. Por outro lado, outros estudos apontam que a modificação de pequenas quantidades de CO₂ no gás de proteção pode diminuir a temperatura das gotas, mantendo, entretanto, uma taxa de deposição similar (MCINTOSH; CHAPUIS; MENDEZ, 2016). Gadallah et al. (2011), ao soldar com arame tubular (FCAW), encontraram resultados mais significativos ao aumentar o teor de CO₂ de 5% para 10% na mistura com Ar, afirmando que essa modificação na mistura gasosa provocou um aumento na taxa de deposição.

Figura 6 - Diferença entre a tensão do arco em argônio puro e com pequenas adições de dióxido de carbono



Fonte: Zielinska et al. (2008)

A formação de inclusões de óxido nos metais de solda está associada ao teor de CO₂ no gás de proteção, especialmente para aços carbono. Um aumento no teor de CO₂ tende a reduzir a formação de inclusões e porosidade na solda, o que favorece a soldagem de aços carbono. Misturas de argônio com menor quantidade de gás oxidante geralmente produzem soldas de qualidade superior em comparação ao CO₂ puro, que pode causar perda de elementos e respingos. Além disso, o aumento da porcentagem de CO₂ promove a formação de ferrita acicular, que melhora a tenacidade da solda e reduz sua dureza (KOU, 2003). Entretanto, há uma quantidade ideal de oxigênio, pois níveis muito baixos podem prejudicar a tenacidade, especialmente ao usar arames de enchimento que visam maximizar Mn e Si. Elevar o teor de CO₂ na mistura para 5–20% pode resultar em maior velocidade de soldagem, maior penetração, menor porosidade e redução dos custos de soldagem (EBRAHIMNIA et al., 2009; KAH; MARTIKAINEN, 2012). Teske e Martins (2010) encontraram que a resistência ao impacto das soldas obtidas é influenciada pela composição das misturas gasosas, tendo como resultado que as peças de teste que apresentaram menores valores de energia absorvida foram também as que mais tiveram inclusões de óxido, como ocorre em misturas de argônio e CO₂ em comparação com misturas ternárias com hélio. Dai (2022) encontrou que quando foi utilizado 100% de Ar ou uma mistura de gás de proteção inerte pura para diferentes processos de soldagem, as inclusões de óxido foram drasticamente reduzidas, e a tenacidade do metal de solda melhorou consideravelmente, equiparando-se à tenacidade do metal de base.

O processo MIG/MAG aqui estudado não utiliza fluxo como o processo por arco submerso (SAW), mas buscando ter uma ideia das reações termoquímicas que ocorrem na interface entre a escória fundida e o metal líquido foram encontrados exemplos dessas reações na literatura que trazem a decomposição de óxidos metálicos no fluxo, a oxidação de elementos de liga no metal líquido pelo oxigênio dissolvido e a dessulfurização do metal de solda. Ao utilizar SAW, Mitra e Eagar (1991) sugeriram que, no ambiente de alta temperatura próximo ao arco de soldagem, todos os óxidos são suscetíveis à decomposição e produzem oxigênio. O SiO_2 e o MnO são as principais fontes de contaminação por oxigênio, e a estabilidade dos óxidos metálicos na soldagem não está diretamente relacionada à sua estabilidade termodinâmica Equações (3) e (4). Além das inclusões de óxido, o oxigênio na poça de soldagem também pode reagir com o carbono para formar o gás CO durante a solidificação, o que pode resultar em porosidade nas soldas de aço. Para combater isso, a adição de desoxidantes, como Al, Ti, Si e Mn no metal de adição ajuda a reduzir essa porosidade.



O O_2 adicionado ao gás de proteção é usado mais comumente com menos do que 5% de O_2 , e é benéfico para estabilizar o arco e reduzir a tensão superficial, favorecendo a formação de pequenas gotas e menos respingos, porém não consegue transferir a qualidade de gás quente como o CO_2 . Estudos apontam que a transição entre modos de transferência metálica recebe a atribuição gradual ao utilizar a mistura com $Ar-2\%O_2$, devido a sua ação na corrente de transição, facilitando a troca do modo globular para o spray projetado, seguida pelo modo de transferência por streaming (KIM; EAGAR, 1993).

O fluxo de gás adequado para quase todas as condições de soldagem é de 10 a 16 L/min. Valores abaixo disso podem não fornecer proteção suficiente e acima podem ser ineficientes e não econômicos, além de prejudicar a eficiência da proteção devido ao caráter turbulento da vazão muito alta. Argônio é mais denso do que o ar, fazendo com que a proteção tenha maior facilidade debaixo da tocha, o que pode prejudicar aplicações fora de posição, precisando aumentar a vazão nesses casos.

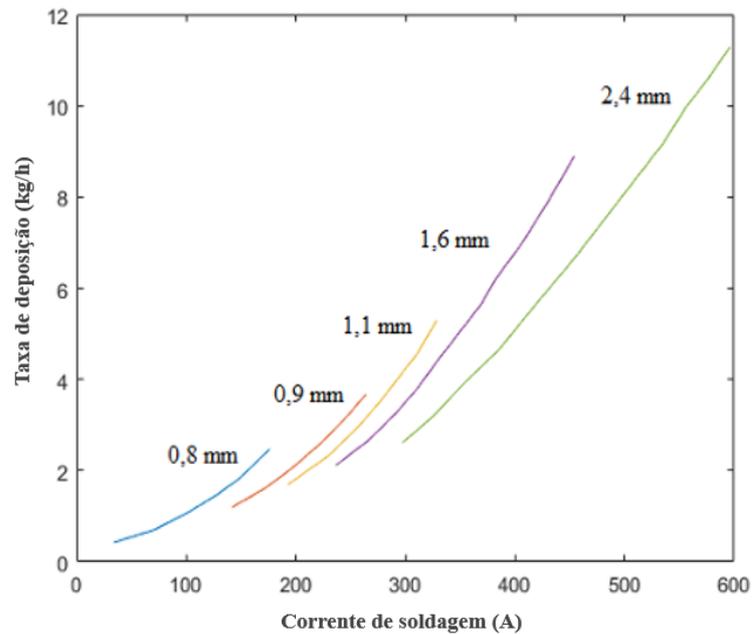
2.4 ARAMES DE SOLDAGEM

O arame-eletrodo é fornecido em bobinas com diâmetros usuais de 0,8 mm, 1,0 mm, 1,2 mm, e 1,6 mm. O sistema de alimentação é composto por um motor que aciona roletes, os quais impulsionam o arame ao longo do mangote em direção à tocha, até o bico de contato a uma velocidade contínua.

Arames com diâmetros pequenos, principalmente abaixo de 1,2 mm, apresentam maior dificuldade na alimentabilidade devido à própria resistência do arame e à extensão longa do mangote. No entanto, a utilização de diâmetros menores permite a soldagem com correntes mais baixas, o que pode ser atrativo. O termo em inglês *melting rate*, traduzido popularmente como taxa de fusão, está relacionado à massa fundida de material por tempo em relação à intensidade de corrente. Há um entendimento de que, para uma mesma corrente, arames mais finos possuem uma taxa de fusão superior. Cary (1979) apresenta esses dados em seu livro, como mostrado na Figura 7. Quando um arame de diâmetro maior é substituído por um de diâmetro menor, ocorrem dois fenômenos principais: o aumento da densidade de corrente no arame-eletrodo e o aumento da relação entre área superficial e volume (A_s/V). Com o diâmetro menor, a densidade de corrente cresce, intensificando o efeito Joule e favorecendo a fusão do arame. Para uma mesma corrente, a velocidade de alimentação aumenta mais do que a redução da seção transversal do arame, o que é crucial para a eficiência da fusão do metal de adição. Além disso, o arame mais fino possui maior área lateral para a mesma unidade de volume, o que acelera a absorção de calor e facilita a fusão. Ainda assim, a influência da densidade de corrente é mais significativa do que a da relação área superficial/volume no aumento da taxa de fusão de arames-eletrodo.

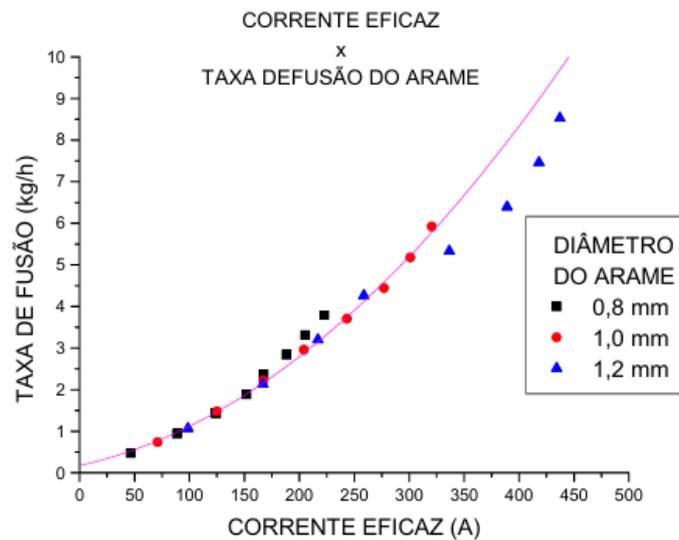
Dutra et al. (2002) realizaram experimentos com arames de aço, mantendo a resistência elétrica do arame eletrodo constante, o que exigiu diferentes alturas da tocha para cada diâmetro de arame e modo de transferência. A análise da corrente e da velocidade do arame (Figura 8) revelou que, nas condições testadas, a relação entre taxa de fusão e corrente de soldagem não é influenciada pela variação do diâmetro do arame no regime de transferência por curto-circuito.

Figura 7 - Taxa de deposição em função da corrente e do diâmetro do arame



Fonte: Cary (1979)

Figura 8 - Comparação da Corrente Eficaz x Taxa de Fusão para arames com diferentes diâmetros



Fonte: Dutra; Santos; Oliveira, (2002)

As composições dos arames utilizados para soldagem são específicas ao processo, sendo que os aços carbonos possuem maior teor de elementos desoxidantes, visto que não há fluxo ou revestimentos para fazer a função de reagir com o oxigênio presente no arco, impedindo a formação de poros. Silício e manganês são os principais desoxidantes adicionados ao aço carbono, e quanto maior o teor de O_2 e CO_2 mais desoxidante o arame deve ser (SCOTTI; PONOMAREV, 2008). Esses elementos reagem com o O_2 formando inclusões esferoidais que

são transportadas através do movimento do metal líquido na poça metálica e tendem a flutuar para fora, mas em algumas situações ainda podem ser encontradas retidas dentro da poça de fusão, após a solidificação. Os óxidos aderidos à superfície e laterais do cordão tem aparência vítrea e são de fácil remoção, como apresentado na Figura 9.

O alumínio, como elemento desoxidante, tende a produzir filmes de alumina. Esses filmes são mais facilmente arrastados pelo fluxo do fluido e retidos dentro da poça (THEWLIS; MILNER, 1977). Em casos onde o gás utilizado tiver pouco potencial de oxidação (<5%) a reação com o elemento desoxidante não ocorrerá e o mesmo será inserido como elemento de liga, o que pode ser benéfico, dependendo do elemento. Manganês como elemento de liga traz boas propriedades ao metal depositado, já altos teores de silício são responsáveis pela fragilização em soldas de aço.

Figura 9 - Cordão com escória de óxido de silício



Fonte: Autora, (2024)

2.5 CURTO-CIRCUITO CONTROLADO

Cada parâmetro de soldagem exerce influência direta no resultado final do cordão de solda. Entre eles, a corrente se destaca como um dos principais determinantes da geometria do cordão, da transferência de metal e da qualidade do resultado final (MVOLA; KAH; LAYUS, 2018). Portanto, na busca por aprimoramentos e otimizações, a modulação estratégica da corrente desempenha um papel fundamental. Boughton (1974) propôs que, se o início de um curto-circuito pudesse ser previsto, a corrente poderia ser limitada a um nível baixo, prevenindo os efeitos explosivos de compressão eletromagnética. A transferência da gota metálica ocorreria então por tensão superficial entre a gota e a poça metálica, o que foi demonstrado ser suave e eficaz com uma fonte de corrente controlada. Desde então, diversas abordagens foram implementadas para atender a esses requisitos (NORRISH; CUIURI, 2014). O termo "transferência metálica por curto-circuito modificado" refere-se a formas de onda de corrente e

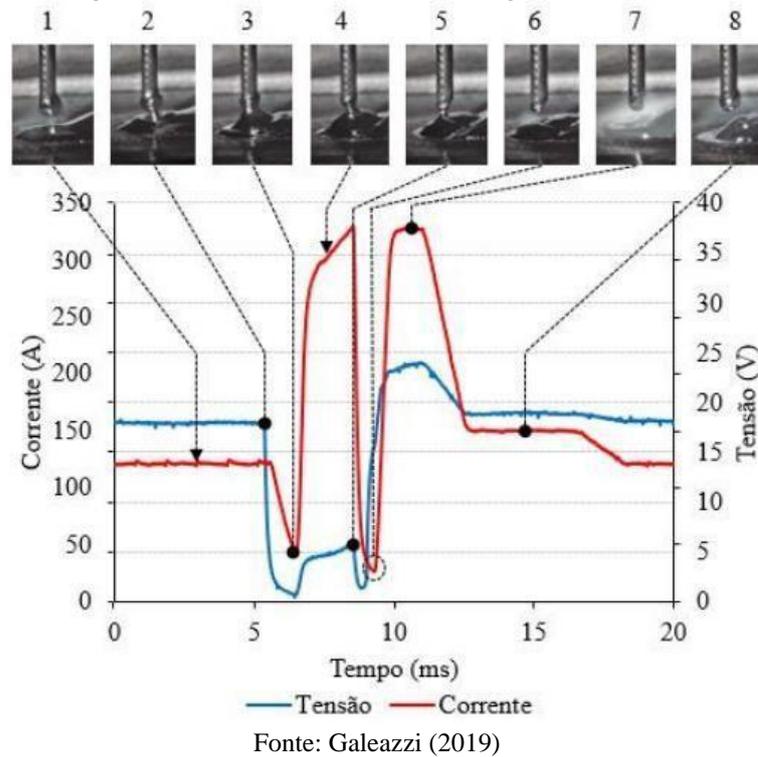
tensão que não são definidas pela indutância, mas por fatores que visam melhorar aspectos específicos da transferência metálica. Diferentes formas de onda oferecem mais opções de controle, permitindo adaptar o processo às especificações de metais-base e eletrodos.

O princípio de funcionamento das variantes MIG/MAG que incorporam controle de corrente envolve monitorar a corrente em cada fase do curto-circuito, reduzindo-a e aplicando pulsos seletivos para promover uma transferência metálica regular, ao mesmo tempo em que trabalha para reduzir respingos, geração de fumos e suavizar as oscilações da poça de fusão. A abordagem moderna do processo MIG/MAG, que inclui controle de corrente durante o curto-circuito, é comercializada sob diferentes nomes, como STT (Surface Tension Transfer) pela Lincoln Electric, RMD (Regulated Metal Deposition) pela Miller Electric, FastROOT pela Kemppi, ControlWeld pela Cloos, ColdArc pela EWM Hightec Welding, entre outros (KAH et al., 2014; DAS et al, 2021).

O LABSOLDA tem se dedicado ao estudo de sua própria versão, o CCC (Curto-Circuito Controlado), desde 1999, quando foi explorado na Tese de Doutorado de Baixo (1999), que apresentou os fundamentos iniciais desse processo. Gohr Jr. (2002) deu continuidade a esse trabalho em sua tese, na qual foram desenvolvidos os equipamentos para a operação do CCC. Desde então, essa variante tem sido objeto de estudo em cinco Dissertações de Mestrado e em diversos artigos (SILVA, 2006; DIRENE, 2014; KINDERMANN, 2016; SARTORI, 2016; GALEAZZI, 2019). O formato de onda característico do processo e cada etapa da transferência metálica estão exibidos na Figura 10.

No processo CCC, a tensão é continuamente monitorada e utilizada para identificar a fase do curto-circuito na qual a transferência ocorreu. Quando a gota metálica faz contato com a poça de fusão, a tensão detectada diminui para valores próximos de zero, levando à formação da ponte metálica. O período de corrente baixa é breve, seguido por um aumento rápido de corrente que atua na contração da ponte metálica recém-formada; à medida que a corrente aumenta, a ponte metálica torna-se mais estreita. A medição constante da tensão ao longo do tempo é empregada para identificar o risco iminente de ruptura da ponte, permitindo que a fonte de energia responda rapidamente antes da ruptura ocorrer. Isso resulta em uma redução drástica da corrente, garantindo que a gota seja separada em um nível de corrente baixo e permitindo um restabelecimento suave do arco.

Figura 10 - Esquema da transferência metálica por curto-circuito controlado



Assim que o arco é estabelecido, um novo pulso de corrente é aplicado, dando início à formação da próxima gota. Em seguida, a corrente é gradualmente reduzida em etapas, o que diminui a quantidade de calor fornecida. Esse controle preciso da corrente elétrica ao longo do processo de soldagem resulta em uma transferência metálica mais controlada, com menor probabilidade de respingos e evita o rompimento abrupto da ponte metálica em altos níveis de corrente. Além disso, a abordagem de redução gradual da corrente também contribui para um menor aporte térmico, o que é fundamental em aplicações de reparo remoto e soldagem fora de posição (DUTRA; SILVA, 2008).

2.6 CORROSÃO E PREPARAÇÃO SUPERFICIAL NA SOLDAGEM

No âmbito do reparo de estruturas corroídas, é crucial dar atenção especial ao estado superficial prévio à soldagem. Embora as boas práticas de soldagem exijam superfícies livres de óxidos, sujeira, graxa e outros contaminantes, poucos estudos oferecem informações específicas sobre a influência real dessas impurezas na qualidade final da solda.

Em um estudo conduzido por Brožek (2018) para avaliar o impacto da limpeza superficial na qualidade da soldagem por pontos, os corpos de prova foram divididos em quatro categorias, dependendo do acabamento superficial prévio à soldagem: sem tratamento prévio; somente desengraxados com acetona; lixados e desengraxados; e jateados e desengraxados. Foi

constatado que, quando os parâmetros de soldagem adequados são empregados, a qualidade superficial não afeta significativamente os resultados da solda.

Entretanto, observou-se um aumento de até 9% na resistência à tração das amostras que foram desengraxadas em relação às não tratadas. É importante notar que a soldagem por pontos é substancialmente diferente dos processos usados para reparo e preenchimento, como o MIG/MAG, onde contaminantes superficiais como óxidos podem interferir no estabelecimento do arco elétrico, contaminar o metal depositado e prejudicar a regularidade da transferência de metal. Portanto, tratamentos superficiais como desengraxe com solventes, limpeza química e enxágue com água não são ideais nesse processo, devido ao risco de deixar resíduos na superfície, o que pode resultar na formação de porosidade durante a soldagem.

A corrosão representa uma das principais causas de falhas em dutos, estruturas de plataformas offshore de petróleo e gás, bem como em plantas petroquímicas (MAINIER et al, 2016). Embarcações marítimas, plataformas e navios flutuantes estão constantemente sujeitos a condições ambientais severas, como ventos fortes, alta salinidade, variações de temperatura e fluxo de gases, que podem resultar em danos estruturais, incluindo rachaduras, corrosão e incrustações biológicas nas superfícies (SOARES et al, 2021). Conforme observado por Bonnin-Pascual (2019) e Elshawesh et al. (2014), as estruturas de plataformas são especialmente afetadas por quatro tipos de corrosão: corrosão uniforme, que se manifesta como uma camada de ferrugem frágil e não protetora e pode ocorrer amplamente em superfícies não revestidas; pitting (covas), um processo localizado que geralmente é iniciado devido à quebra do revestimento em áreas específicas, estendendo-se por corrosão localizada em pequenas cavidades profundas, podendo levar à perfuração do casco em pontos isolados; frestas, outro processo localizado, caracterizado por corrosão linear que ocorre em junções estruturais onde a água se acumula e flui; e corrosão galvânica, que ocorre quando dois metais diferentes entram em contato, levando a uma corrosão mais rápida em um dos metais.

2.7 SOBREPOSIÇÃO DE CORDÕES

Na soldagem de reparo e na manufatura aditiva, a principal diferença em relação à soldagem convencional está no fato de que ao invés de buscar unir peças e valorizar parâmetros que garantem alta penetração para garantir a resistência da junta, a geometria do cordão de solda desejada é aquela que resulte em uma camada depositada de geometria uniforme e livre de defeitos, e para isso é necessária uma adequada união entre os cordões depositados. A Figura 11 traz o resultado do trabalho de Bonacorso (2004), cujo objetivo foi a recuperação

automatizada de superfícies danificadas por cavitação. Ao utilizar o processo de soldagem plasma com alimentação de arame, o autor obteve um excelente resultado, ilustrando o tipo de sobreposição de cordões esperado neste trabalho. A deposição de camadas teve boa qualidade geométrica, com quantidade insignificante de poros e sem falta de material ao longo de toda superfície recuperada.

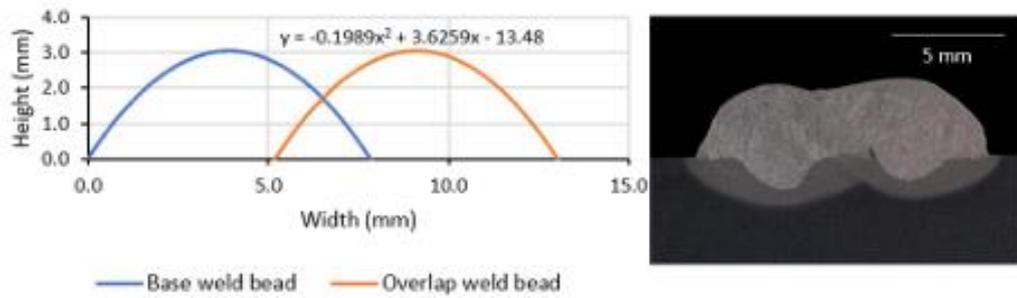
Figura 11 - Recuperação automatizada de superfícies danificadas por cavitação



Fonte: Bonacorso (2004)

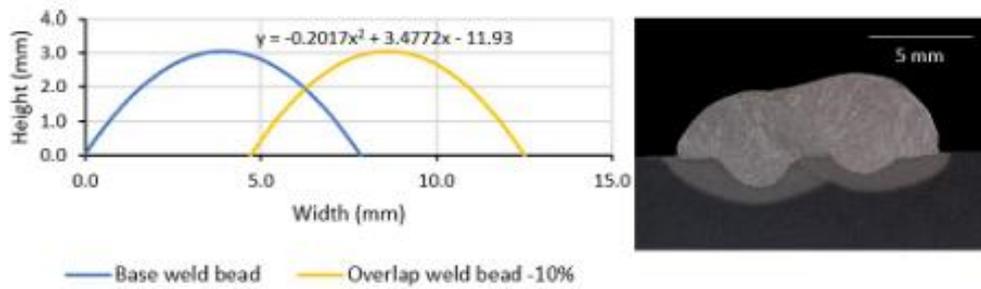
Rocha et al. (2021) desenvolveram um algoritmo baseado na geometria dos cordões que pode ser representada com alta precisão por funções de segundo grau, com erro inferior a 2%, e que ao ajustar o afastamento entre os passes a falta de fusão pode ser reduzida e garantir uma deposição uniforme do material. A função desenvolvida e os cordões sobrepostos estão apresentados na Figuras 12. Na Figura 13 está apresentado o resultado obtido após o ajuste na distância entre centros.

Figura 12 - Função de sobreposição criada e macrografia dos cordões soldados



Fonte: Rocha et al. (2021)

Figura 13 - Função de sobreposição criada e macrografia dos cordões soldados com ajuste de -10% na distância entre centros



Fonte: Rocha et al. (2021)

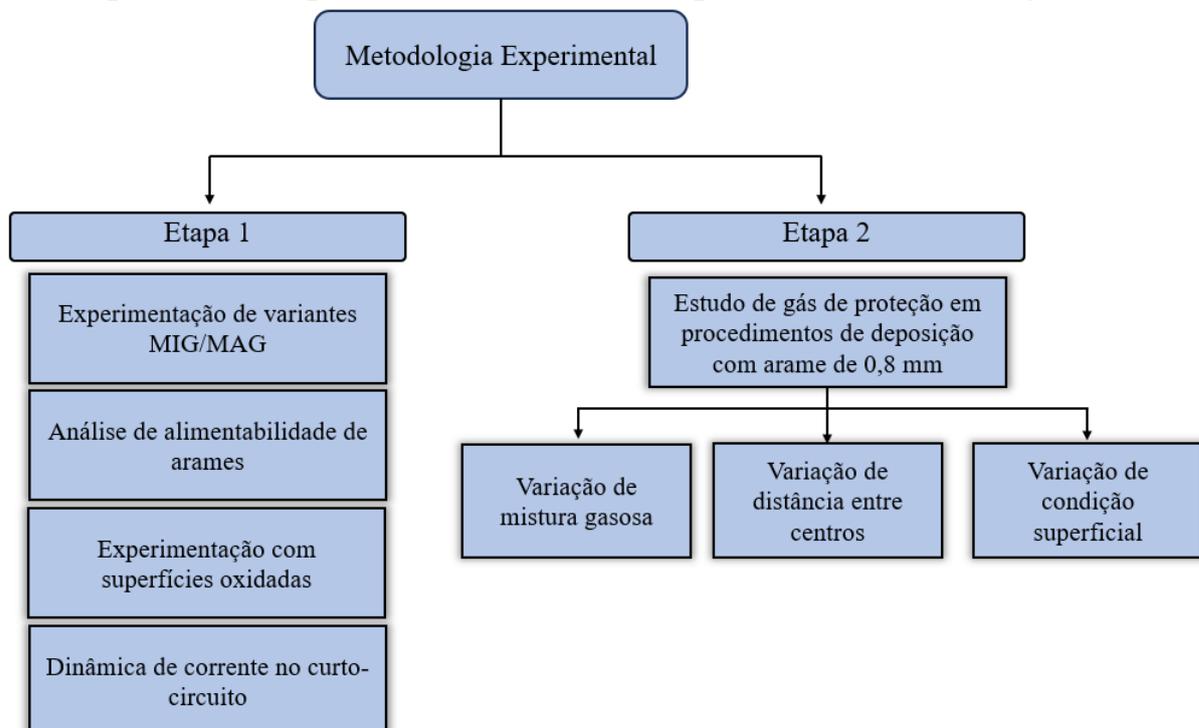
A distância ideal entre os centros dos cordões sobrepostos é de 60% a 73% da largura do cordão base, o que ajuda a minimizar a falta de fusão sem alterar significativamente a geometria da solda.

3 MÉTODOS, EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

3.1 MÉTODOS

A metodologia abordada para atender os objetivos do trabalho será apresentada neste tópico, assim como os materiais e equipamentos utilizados. A metodologia foi desenvolvida em duas etapas, como apresentado no fluxograma da Figura 14. A primeira foi referente ao estudo de diferentes variantes do processo MIG/MAG, a análise de alimentabilidade de arames, ensaios em superfícies oxidadas e exploração de diferentes metodologias de cálculo da derivada de corrente. Essa etapa foi utilizada como base para o desenvolvimento do trabalho e experimentos realizados na etapa seguinte, que consiste no estudo do gás de proteção, onde foram experimentadas diferentes misturas gasosas, variação na distância entre centros para garantir a aderência entre cordões e soldagem sobre chapas limpas e com oxidação superficial.

Figura 14 - Fluxograma ilustrativo da metodologia de ensaios e análises aplicados



3.1.1 Experimentação de variantes MIG/MAG

Os ensaios experimentais iniciais foram fundamentais para a definição do processo de soldagem e do tipo de arame de deposição mais adequado. Esses ensaios tiveram como objetivo identificar as alternativas que melhor se adaptariam à aplicação de soldagem em reparo remoto, considerando fatores como estabilidade do processo, qualidade da solda e a viabilidade em condições específicas de operação.

3.1.1.1 *Seleção da variante MIG/MAG que mantém regularidade em grandes variações geométricas*

Os primeiros ensaios realizados tiveram como finalidade abordar a conservação da regularidade do processo em condições onde a superfície a ser soldada tem grandes variações geométricas, provocando mudança constante na distância entre o bico de contato e a peça. Esse teste foi essencial para a determinação do processo de soldagem que seria utilizado ao longo do trabalho.

As variantes do processo MIG/MAG testadas foram a Convencional e Curto-Circuito-Controlado. a forma de onda de corrente utilizada para o CCC foi baseada em programação sinérgica desenvolvida na dissertação de mestrado do Kindermann (2016), onde primeiro deve-se selecionar o tipo de material de adição, o gás de proteção e o diâmetro de arame, e posteriormente deve ser regulada a velocidade de alimentação de arame (V_a) e um parâmetro adimensional nomeado “a”, que atua diretamente na intensidade da corrente de base. As velocidades de alimentação disponíveis nesse programa sinérgico são de 2,0 até 6,0 m/min com resolução de 0,1 m/min e os valores para “a” são de -50 a 50, com resolução de 1. A parametrização da variante convencional foi realizada na posição plana, buscando um processo com regularidade geométrica.

Para a fabricação de corpos de prova que reproduzissem uma condição de variação geométrica superficial, foram unidas longitudinalmente duas chapas de aço ASTM A36 com 3/8” de espessura e 50 mm de largura, formando um “V”, onde a diferença de altura entre as extremidades e o vale é de 22 mm com uma inclinação de aproximadamente 13°. Os cordões foram depositados perpendicularmente à união das chapas seguindo o conjunto de ensaios apresentados na Tabela 2, e esses parâmetros foram testados primeiramente na posição plana. Para essa etapa foi utilizado o arame ER70S-6 com 1,2 mm de diâmetro e o gás de proteção escolhido foi a mistura 25% CO₂ e 75%Ar.

Tabela 2 - Parâmetros utilizados no conjunto de ensaios

Processo	Va (m/min)	Parâmetro Adimensional "a"	Tensão de Referência (V)	Vs (cm/min)
Curto-Circuito Convencional	5	-	21	45
	4	-	20	
	3	-	19	
Curto-Circuito Controlado Sinérgico	5	60	-	
	4	15	-	
	3	0	-	
	3	10	-	

Para avaliar os ensaios foi utilizada somente análise visual, comparando a regularidade geométrica dos cordões soldados e pela verificação de estabilidade dos parâmetros elétricos utilizando o Sistema de Aquisição Portátil (SAP).

3.1.1.2 Análise da alimentabilidade de arames

Parte do desenvolvimento do trabalho foi a abordagem com utilização de arames de diâmetro menor do que 1,2 mm, visto que a maior parte dos trabalhos fazem uso de arames com bitolas dessa dimensão e a utilização de diâmetros de 1,0 mm e 0,8 mm são raras. Para esse trabalho, a utilização de um arame com diâmetro reduzido busca conciliar as limitações impostas pela aplicação remota, através da viabilização do uso de uma fonte com capacidade reduzida, que como consequência diminuiria o peso carregado pelo robô soldador.

Ao utilizar um arame de menor diâmetro, é possível soldar com correntes médias e de pico inferiores. A qualidade da alimentação de arame-eletrodo da bobina até o bico de contato é um dos principais requisitos tecnológicos de um equipamento que opera qualquer processo de soldagem com alimentação constante, e uma limitação mecânica de arames com diâmetro reduzido é a sua seção transversal menor, que pode aumentar a probabilidade de ocorrência de instabilidades na alimentação. Os arames utilizados nessa etapa foram o ER70S-6 com diâmetros de 0,8 mm e 1,0 mm e o gás de proteção foi o 25%CO₂ e 75% Ar. Buscando encontrar velocidades de alimentação críticas para ambos arames testados, o conjunto de ensaios realizados foi uma varredura de velocidade de alimentação até ocorrer travamento, iniciando com uma velocidade de aproximadamente 4 m/min e com acréscimo de 2 unidades analógicas da fonte. Foram utilizadas as escalas para velocidade de alimentação da fonte de 4, 6, 8, e 10, já que foram observadas pequenas variações entre os diferentes arames devido a força

necessária para movimentá-los. Os parâmetros apresentados nas Tabelas 3 e 4 foram os aquisitados devido ao controle da fonte ser analógico.

Tabela 3 - Parâmetros medidos para os ensaios com arame 0,8 mm

Velocidade de alimentação (m/min)	Tensão média (V)	Condição de restrição do mangote
4,6	15,5	Menor
7,6	17,1	Menor
10,7	19,6	Menor
13,1	23,3	Menor
13,0	23,7	Maior

Tabela 4 - Parâmetros medidos para os ensaios com arame 1,0 mm

Velocidade de alimentação (m/min)	Tensão média (V)	Condição de restrição do mangote
4,0	17,7	Menor
6,5	19,7	Menor
8,2	23,5	Menor
13,6	23,5	Menor
13,2	23,4	Maior

O mangote de 3 metros foi posicionado de forma a forçar condições com curvas extremas, como apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Bancada com o mangote com menor e maior condição de restrição



A avaliação desses ensaios foi feita em tempo real, analisando a regularidade do processo e travamentos perceptíveis no arame. Também foi realizada a de medição da velocidade de alimentação (ponto de referência da medição utilizado foi entre o desentortador e os roletes), através do Sistema de Aquisição Portátil (SAP), que conseguiu registrar reduções e oscilações bruscas.

3.1.2 Experimentação com superfícies oxidadas

O trabalho se propõe a experimentar tecnologias que possam mitigar os efeitos negativos de soldar sob superfícies em condições degradadas por oxidação. Os testes descritos a seguir buscaram identificar condições de oxidação limitantes que, independente de métodos mitigantes, inviabilizaram a soldagem.

Visto que os manuais de soldagem indicam fortemente o tratamento superficial pré-soldagem, não existe literatura que abranja diferentes condições de degradação superficial e detalhe o impacto na soldagem. Utilizando soldagem manual, foram realizados testes com soldagem de deposição de cordão sob duas peças do estoque do Labsolda que haviam sofrido elevada degradação por oxidação, apresentadas na Figura 16.

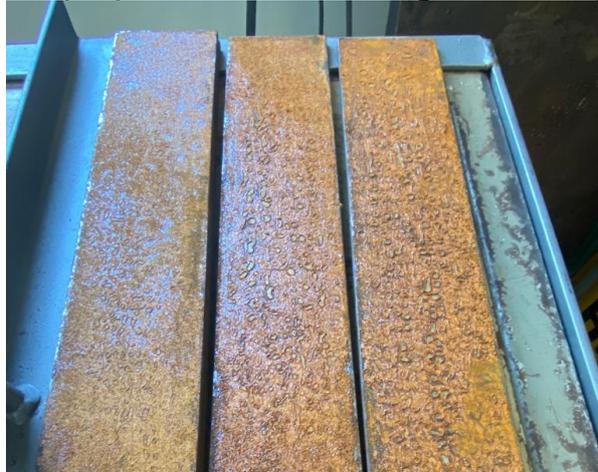
Figura 16 - Peças em extremo nível de degradação por corrosão



As peças escolhidas apresentam uma camada expressiva de óxidos em sua superfície, o que impede a passagem de corrente elétrica e dificulta a abertura do arco elétrico. Portanto, na peça em maior estado de degradação foi soldada uma chapa limpa de ASTM A36 para realizar a abertura do arco e avaliar somente se o mesmo conseguiria se manter aberto ao longo do comprimento da peça.

Buscando corpos de prova em oxidação mais uniforme e leve, foram produzidas as chapas da Figura 17, sendo que as mesmas foram molhadas com água da torneira após passarem pelo processo de esmerilhamento e deixadas para oxidar durante um mês.

Figura 17 - Chapas produzidas com menor grau de oxidação



3.1.3 Dinâmica de corrente no curto-circuito

No caso da transferência metálica por curto-circuito no processo MIG/MAG convencional, os principais parâmetros a serem escolhidos são velocidade de alimentação, tensão de referência, e velocidade de soldagem. Apesar disso, a taxa de subida e descida da corrente é um fator que pode alterar significativamente o desempenho do processo, tendo influência sobre o valor da corrente média, frequência de curto circuito e valores de pico de corrente. Em muitas fontes de soldagem é possível alterar essa taxa por meio da indutância ou efeito indutivo possibilitando maior uniformidade na transferência metálica, regularidade do processo e redução do número de respingos. Fontes eletrônicas, como a utilizada nessa etapa do trabalho, permitem regular uma indutância na subida diferente da de descida da corrente.

Nas fontes fabricadas pela IMC, o ajuste diferenciado das indutâncias de subida (L_s) e de descida (L_d) é realizado através de parâmetros denominados k_s (subida) e k_d (descida), que possuem uma relação com o inverso das indutâncias, seguindo a Equação (5). Portanto, quanto maior o valor de k_s e k_d , menor a indutância na fase e mais rápida a resposta da fonte.

$$k_s = \frac{L_{Fonte}}{L_s} \quad (5)$$

O valor da indutância é específico para cada fonte de soldagem, o que torna insuficiente a simples apresentação dos parâmetros k_s e k_d para a replicação e caracterização de um ensaio. Um modo mais preciso de representação é por meio da taxa de crescimento e decréscimo da corrente, que é diretamente influenciada pela indutância. Atualmente, não existe uma metodologia padrão para medir essa taxa no processo MIG/MAG convencional

consolidada na literatura, e ao longo do desenvolvimento dos procedimentos de soldagem houve dúvida se a metodologia usada (cálculo disponibilizado pelo SAP) de fato estava correspondendo à realidade. Diante dessa dúvida, o presente trabalho irá apresentar diferentes metodologias aplicadas à medição da taxa de variação da corrente para o mesmo conjunto de dados.

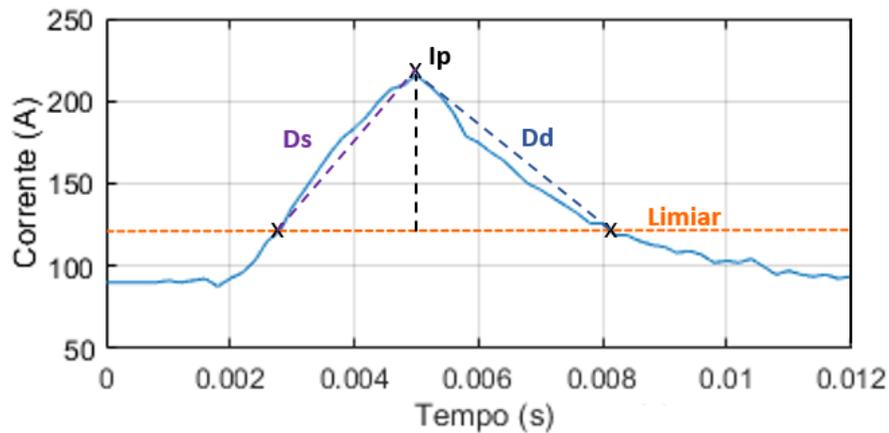
3.1.3.1 Cálculo da taxa de corrente com o Sistema de Aquisição de Dados Portátil

Nos trabalhos realizados pelo LABSOLDA, foram utilizadas as ferramentas do Sistema de Aquisição de Dados Portátil (SAP) para monitorar as características dinâmicas durante o processo de soldagem. A metodologia adotada por esse sistema analisa as diferentes fases do oscilograma, tratando-as como triângulos retângulos para calcular as inclinações das retas de subida e descida da corrente. Com os dados completos do oscilograma, uma linha reta, chamada "limiar da corrente", é traçada atravessando a curva de corrente. O ponto em que essa linha cruza a curva pode ser ajustado pelo usuário ou configurado para o valor padrão, que corresponde à Corrente Média calculada pelo programa ao longo do período analisado.

O limiar da corrente define a fronteira para a detecção de eventos, servindo como referência para identificar os picos de corrente (I_p) e calcular as derivadas de subida (Ds) e descida (Dd), como mostrado na Figura 18. O software traça duas retas: uma ligando o ponto em que a curva da corrente cruza a linha do limiar durante a subida até o pico de corrente, e outra ligando o ponto de descida ao pico. Dessa forma, as derivadas de subida e descida são calculadas com base na inclinação dessas retas.

Essa metodologia de medição apresenta alguns pontos que devem ser observados com cuidado para não descaracterizar a medição, visto que nem sempre o valor médio da corrente vai ser o melhor valor do limiar, principalmente para a fase de arco (descida). A customização do limiar pode auxiliar na melhor representatividade da reta das taxas, porém, deve-se levar em consideração que o comportamento da corrente durante o curto-circuito ou arco aberto não se comporta exatamente como uma reta e sim como uma curva na maioria dos casos, e a utilização de uma reta para representar esse comportamento pode estar mascarando dados importantes.

Figura 18 - Esquemático da metodologia de cálculo da taxa de corrente pelo SAP



Também deve ser levado em consideração que esse método de medição somente é válido para operações com transferência em curto-circuito, outros formatos de onda mais complexos (CMT, CCC e pulsados) possuem fases diferentes ao longo de um ciclo, e o software não consegue distinguir.

3.1.3.2 Cálculo baseado na linha de tendência e média de derivadas de 10 pontos

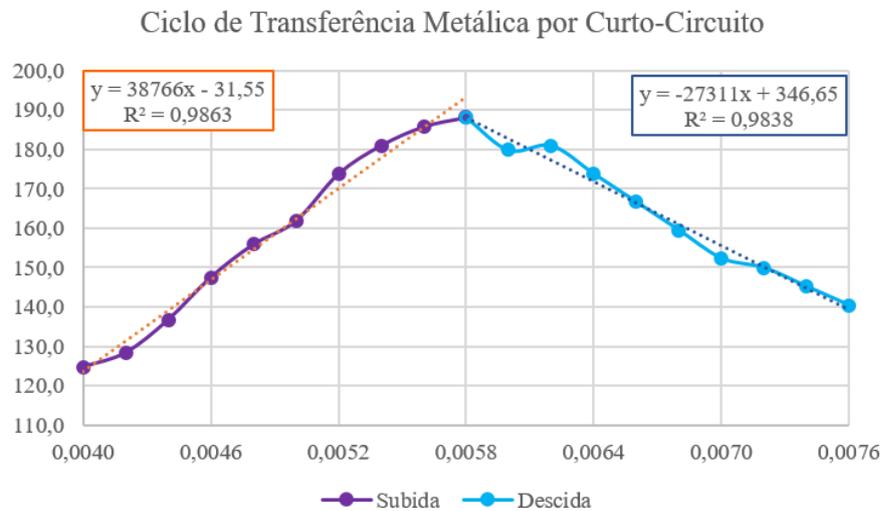
Com os dados registrados pelo SAP, é possível exportar um arquivo de texto e analisá-los no Excel. Após exportar, foram identificados os picos de corrente e, utilizando-os como referência, foram selecionados 10 pontos de medição (incluindo o pico) anteriores para a taxa de subida de corrente, e 10 pontos posteriores para a taxa de descida. Com esses dados, foram aplicados dois métodos diferentes para determinar a taxa de variação da corrente.

O primeiro método consistiu em calcular a média das taxas de variação instantâneas desses 10 pontos selecionados, conforme a Equação (6), tanto para a fase de subida quanto de descida da corrente.

$$\Delta I = \frac{I_i - I_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (6)$$

O segundo método utilizou a função de linha de tendência linear, com base nos mesmos dados, que foram plotados separados como período de curto e o período de arco, como ilustrado na Figura 19. Os valores de inclinação da reta calculados foram registrados e a média deles calculada. Apenas taxas que apresentaram a medida de R-quadrado superior a 95% foram registradas.

Figura 19 - Representação esquemática da metodologia de cálculo da taxa de corrente pela linha de tendência



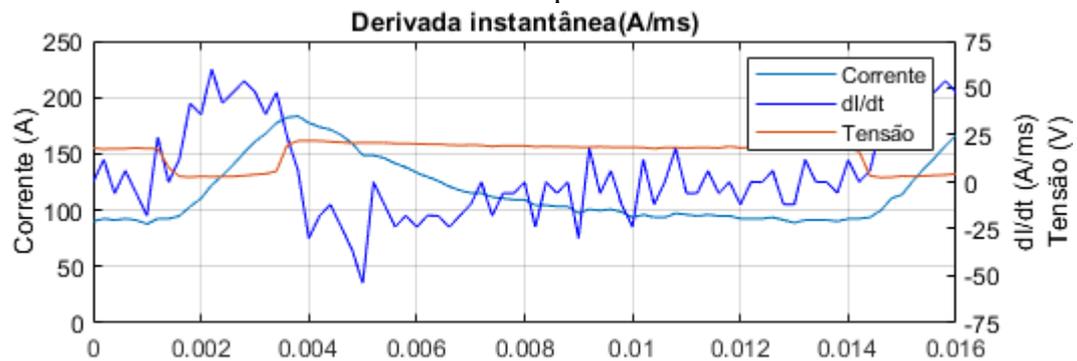
3.1.3.3 Cálculo baseada em médias de derivadas

Com a análise detalhada do comportamento da corrente ao longo dos ciclos de transferência metálica, notou-se que o comportamento da taxa de subida e descida não pode ser completamente representado por uma reta, e sim que a inclinação entre os pontos registrados está constantemente variando. Portanto foi desenvolvida a metodologia de plotar a derivada instantânea em um gráfico e acompanhar o seu comportamento ao longo do ciclo de transferência.

A taxa instantânea de subida e descida da corrente foi novamente calculada, porém dessa vez para todos os pontos e não somente os 10 anteriores e após o pico. Esses valores foram plotados junto com a corrente e tensão instantâneas em função do tempo. Como apresentado na Figura 20.

Além de serem utilizadas nos gráficos, todas as medições das taxas de variação instantânea da corrente foram registradas em um vetor, separadas em valores positivos e negativos (valores iguais a zero foram descartados). Os valores positivos correspondem às derivadas de subida da corrente, enquanto os negativos representam as derivadas de descida. Para cada grupo (positivo e negativo), foi calculada a média inicial, utilizada como base para estabelecer um limiar. Esse limiar serve para desconsiderar os momentos onde a corrente não varia significativamente, devido a tensão de referência ter sido atingida (como durante a formação da gota antes do curto-circuito).

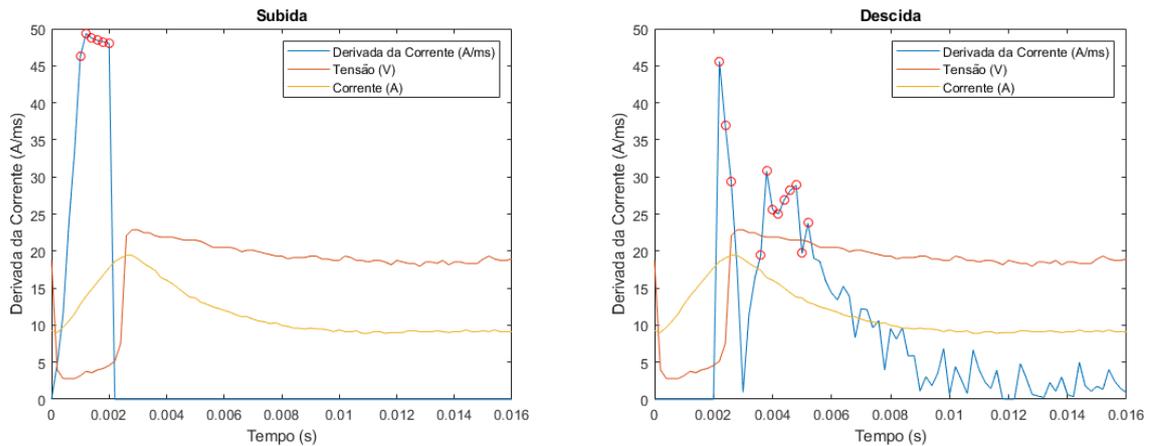
Figura 20 - Taxa instantânea de corrente plotada junto com a corrente e tensão em função do tempo



Com os valores acima desse limiar, foi calculada uma nova média que representa melhor os patamares das taxas de variação positivas e negativas nos gráficos — fornecendo assim uma melhor representação da variação da corrente nos momentos analisados (subida e descida). Em alguns cálculos, especialmente no cálculo da taxa de descida da corrente, foi necessário aumentar o limiar para 1,5 ou até 2 vezes a média inicial. Isso ocorreu devido ao maior número de valores instantâneos baixos e ao tempo de arco superior ao de curto-circuito, o que reduziu a média inicial e resultou em um desvio elevado, gerando um valor médio final não representativo.

Para visualização, foi gerado um gráfico com os valores positivos, acompanhados pelas curvas de tensão e corrente em função do tempo, como mostrado na Figura 21. Os valores incluídos no cálculo da média final foram destacados com marcadores vermelhos. O mesmo procedimento foi aplicado aos valores negativos, representados em valor absoluto.

Figura 21 - Gráfico com os valores de taxa de corrente instantâneas acima do limiar calculado, acompanhados pelas curvas de tensão e corrente em função do tempo



3.1.4 Estudo sobre o gás de proteção em procedimentos de deposição com arame 0,8 mm

Os primeiros ensaios com cordões sobrepostos, foram realizados para verificar a possibilidade de soldar, em chapa limpa e oxidada, sem limpar com uma escova de aço entre os passes para remover impurezas. A análise detalhada desses cordões expôs um tema importante que deve ser explorado; além dos gases de proteção mitigarem os efeitos da oxidação dos cordões eles devem reduzir a formação de sílica na região dos flancos dos cordões soldados para garantir um reparo de qualidade. Os gases estudados são misturas de argônio com: 25% CO₂, 8% CO₂, e 2% O₂.

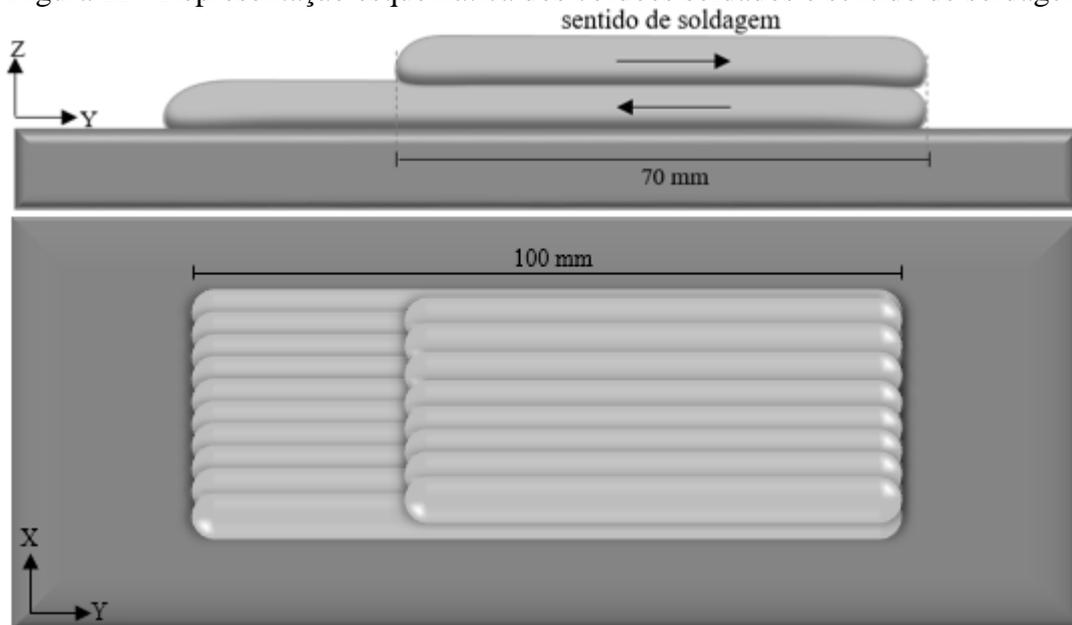
3.1.4.1 Soldagem Robô Antropomórfico

Buscando maior precisão geométrica de movimentação, foi utilizando um robô antropomórfico para a realização dos ensaios seguintes. A maior confiabilidade na velocidade e posicionamento da tocha é fundamental para isolar somente os efeitos da sílica na aderência entre cordões, garantindo maior repetibilidade.

Os cordões de solda foram depositados sobre a chapa, na posição plana, com uma DBCP de 15 mm. Entre a deposição dos cordões, não foi realizada nenhuma limpeza, buscando manter sobre a superfície a sílica ou qualquer outra impureza formada ao longo do processo. Cada pad possui uma primeira camada com 9 cordões de 100 mm e uma segunda camada com 9 cordões de 70 mm, soldados no sentido oposto, com início a 70 mm do começo do cordão inferior, como demonstrado na representação esquemática da Figura 22. O arame utilizado foi

de aço carbono AWS ER70S-6, com diâmetro de 0,8 mm, e a vazão dos gases de proteção foi mantida em 15 L/min para todos os ensaios.

Figura 22 - Representação esquemática dos cordões soldados e sentido de soldagem



Para definir a distância entre centros dos cordões, utilizou-se um paquímetro para medir a largura do primeiro cordão, e a partir dessa largura foi determinada a distância como uma porcentagem da mesma. Inicialmente foram utilizados os cordões soldados na etapa anterior como padrão e selecionada uma distância igual a 70% da largura dos mesmos, que foi aproximadamente 4,3 mm. Após a execução de um cordão a temperatura da chapa foi monitorada até que a chapa chegasse em uma temperatura abaixo de 100 °C, que foi averiguada com o termopar de contato, para dar sequência na fabricação.

Nessa etapa, a fonte Digiplus A7 foi utilizada, visto que a mesma possui regulagem digital (não analógica, maior resolução) da velocidade de alimentação e tensão, podendo assim fazer pequenos ajustes se necessário. A transição da parametrização para a nova fonte foi realizada utilizando o sistema de aquisição portátil para medir a tensão e velocidade de alimentação médias dos ensaios realizados anteriormente e encontrando o equivalente, sendo que a tensão média é medida na tocha.

Para a reprodução dos ensaios nessa nova bancada, foi necessário realizar pequenos ajustes de parametrização, que serão explicados na sequência com as suas justificativas. O primeiro ajuste necessário foi no momento de início do processo. O primeiro contato do arame com a chapa mostrou-se instável, levando aproximadamente 10 segundos para se estabilizar,

como apresentado no oscilograma da Figura 23. Essa dificuldade em regularizar o processo no início pode ser explicada pela baixa temperatura da chapa, pela geometria da ponta do arame ou pela baixa tensão empregada no ensaio, o que provoca irregularidades na geometria do produto final, como pode ser observado na Figura 24. No momento da abertura, há um elevado número de respingos grosseiros aderidos à chapa, além de inconsistências na geometria do cordão.

Figura 23 - Exemplo de oscilograma sem abertura ajustada

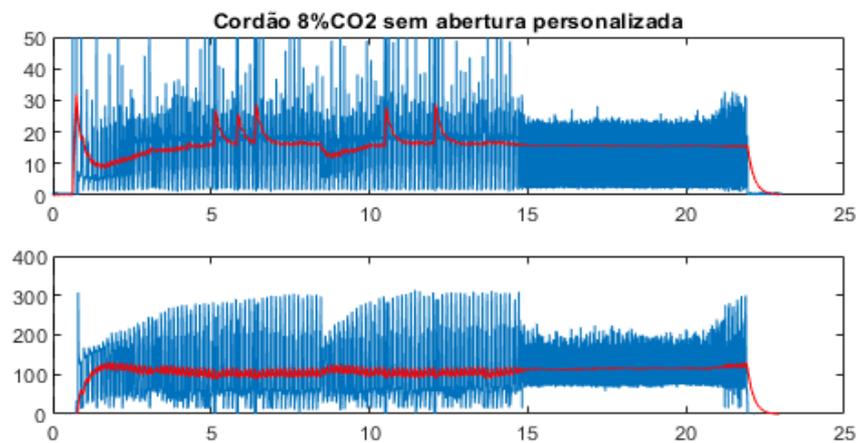
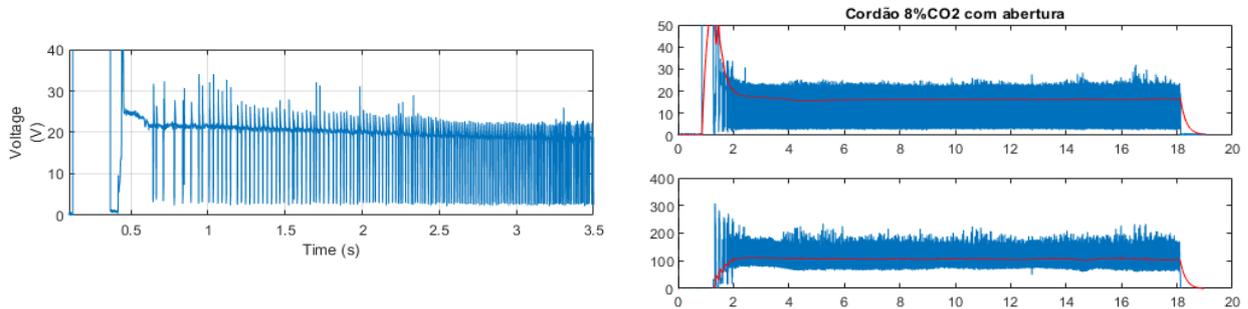


Figura 24 - Cordões soldados sem abertura ajustada



Um modo de solucionar essa problemática é aplicar uma energia maior por um tempo curto, até que o arco consiga se estabelecer e iniciar o processo. Foram realizados alguns testes para determinar um tempo e uma tensão de abertura, e encontrou-se a parametrização de 25,5 V por 2,5 s, que auxiliou a regularizar o início da operação, como pode ser visto na Figura 25.

Figura 25 - Oscilogramas a) aproximado da tensão; e b) da tensão e corrente de um cordão com abertura ajustada



Com o início do processo corrigido foram realizados mais testes exploratórios para fabricação dos cordões. Com esses testes foi possível verificar que o valor de tensão medido na tocha de soldagem estava divergente do valor de tensão regulado na fonte, em uma proporção maior do que nos últimos ensaios, devido ao aumento significativo do mangote, que foi de 1,5 m para 3 m. Portanto foi elevada a tensão em 1 V (20,5 -> 21,5). Com todos esses ajustes realizados, foi possível obter um processo estável e confiável em todas as repetições com gás 8% CO₂ e 2% O₂.

Ao contrário dos experimentos anteriores, a tentativa de utilizar a mesma tensão do que para os outros gases não foi satisfatória para o gás com 25% CO₂. A defasagem entre a tensão medida e regulada foi superior para esse gás, impossibilitando a estabilização do processo com a energia baixa. Portanto, foi-se experimentalmente aumentando a tensão até que o processo se estabilizasse repetidamente, o que ocorreu com tensão de 23,5 V. Os parâmetros utilizados para os ensaios finais estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 5 - Parâmetros utilizados para soldagem dos *pads*

Gás de Proteção	Velocidade de alimentação (m/min)	Tensão (V)	Velocidade de Soldagem (cm/min)
8% CO ₂	7,5	21,5	30,0
25% CO ₂	7,5	23,5	30,0
2% O ₂	7,5	21,5	30,0

Após a realização desses ensaios foram repetidos cordões simples e verificado que a largura dos mesmos ao utilizar o robô diverge da largura dos cordões soldados com o tartilope, devido a uma possível imprecisão da velocidade ao utilizar esse manipulador. Para ajustar esse parâmetro, foram realizadas novas medições e o novo valor de distância entre centros foi de

3,335 mm para 8% CO₂ e 2% O₂, e 4,003 mm para 25% CO₂, correspondente a 66,7% da largura dos cordões soldados com cada gás.

Com parametrização elétrica e geométrica satisfatórias foram fabricados novos *pads* em cima das chapas com oxidação, preparadas como mencionado anteriormente.

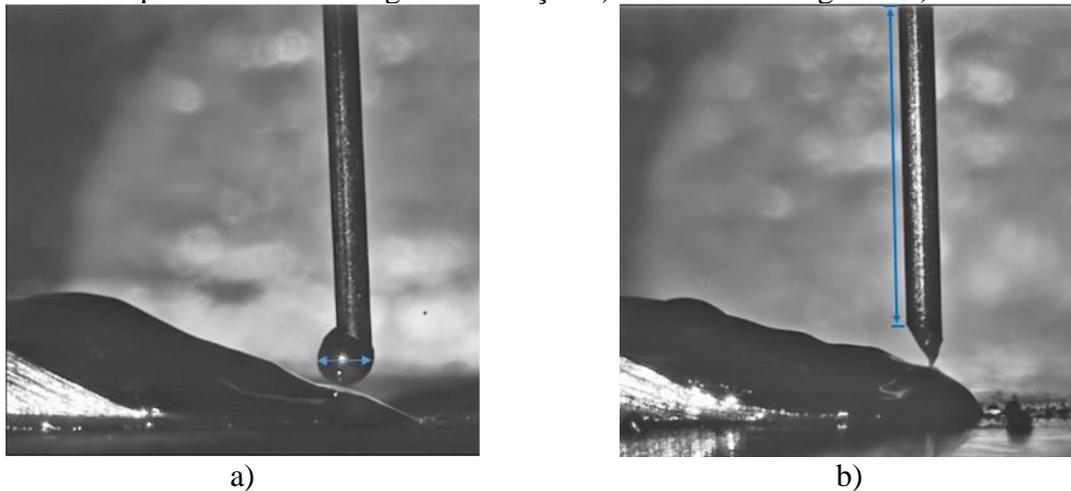
3.1.4.2 *Medições e análises*

A análise dos sinais elétricos e comportamento do processo, assim como a medição da velocidade de alimentação foram realizadas utilizando o Sistema de Aquisição Portátil (SAP). Os oscilogramas apresentados como figuras neste trabalho apresentam janelas de tempo diferentes, dependendo do fenômeno a ser mostrado. Os cálculos dos valores de tensão média, corrente média, potência média, frequência de destacamento e corrente eficaz foram realizados utilizando os valores de 10 segundos consecutivos no meio da operação. Os dados utilizados para o cálculo da taxa de subida e descida da corrente são correspondentes a 10 ciclos consecutivos retirados também da metade da aquisição da operação. Na fabricação dos *pads* a aquisição dos sinais elétricos foi realizada individualmente, cordão por cordão, totalizando 18 aquisições por peça.

A verificação da estabilidade do processo foi realizada através da aparência final do cordão, por meio de inspeção visual. Além disso, foi verificada a repetibilidade do processo, através de análise das variáveis elétricas e análise sonora ao longo do processo.

Para realizar uma análise mais detalhada, foram realizados ensaios com filmagem em alta velocidade, buscando comparar tamanho de gota e altura do arco entre os diferentes gases e preparações superficiais das chapas. O software utilizado para realizar essas medições foi o ImageJ e a metodologia utilizada está apresentada na Figura 26 a) e b). Devido à variação no tamanho da poça e o ângulo utilizado para as filmagens, não foi possível encontrar uma boa referência para a medição da altura do arco, portanto a mesma foi medida indiretamente através do que aqui será chamado de *stick-out* visível, que é o comprimento do arame, iniciando no limite inferior esquerdo do mesmo até o final do frame (todas as filmagens foram realizadas com a câmera e chapa na mesma posição). Com as filmagens desses ensaios também foi possível medir a velocidade relativa de alimentação do arame, utilizando uma referência no arame-eletrodo e acompanhando a movimentação da mesma por alguns frames, visto que os resultados revelaram travamentos do arame. Além das filmagens em alta velocidade foram realizadas filmagens com câmera de processo buscando registrar a fusão e formação de sílica ao longo da soldagem com os gases utilizados.

Figura 26 - Esquema da metodologia de medição a) do tamanho de gota e b) *stick-out* visível



As inclusões encontradas na seção transversal dos *pads* foram analisadas com o auxílio de um Microscópio Óptico (MO) e de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Também foi utilizado a técnica de Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) para análise de composição química das inclusões.

Por fim, a análise de composição química da superfície da segunda camada dos *pads* foi realizada utilizando a espectrometria de emissão óptica, buscando divergências entre as amostras devido a utilização de diferentes gases, a formação em maior quantidade de sílica e soldagem em superfície com oxidação.

3.2 MATERIAIS

Para a realização das soldas utilizou-se como material de base chapas de aço carbono ASTM A36, com dimensões de 75 mm de largura, 200 mm de comprimento e 9,53 mm (3/8") de espessura para chapas limpas e 6,35 mm (1/4") de espessura para as chapas com oxidação. O arame utilizado na realização dos ensaios como material de adição foi o aço carbono AWS ER70S-6 com 0,8; 1,0 e 1,2 mm de diâmetro. A composição química esperada do material das chapas e dos arames estão apresentadas nas Tabelas 7 e 8, respectivamente.

Tabela 6 - Especificação da composição química das chapas (%)

C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	Cr	Mo	C
0,18	0,68	0,20	0,016	0,011	0,17	0,07	0,16	0,02	0,003

Tabela 7 - Especificação da composição química dos arames (%)

C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	Cr	Mo
0,06-0,15	1,40-1,85	0,80-1,15	<0,035	<0,025	<0,50	<0,15	<0,15	<0,15

Os gases utilizados para os processos de soldagens são misturas de argônio com: 25% CO₂, 8% CO₂, e 2% O₂.

3.3 EQUIPAMENTOS

Ao longo do projeto foram utilizados equipamentos diferentes até chegar na bancada final. Menções especiais de equipamentos utilizados são a fonte de soldagem tiristorizada da fabricante CLOOS, tocha de soldagem modelo MIG Automático TBI 511, com refrigeração à água de 1,5 m, e manipuladores de tocha Tartílope modelo SM2-500 (Sistema Modular de 2 Eixos com 500 mm de curso), desenvolvido internamente pelo LabSOLDA.

Os ensaios de fabricação dos *pads* com diferentes gases em chapas limpas e chapas oxidadas foram realizados na bancada experimental apresentada na Figura 27, constituída por uma fonte de soldagem IMC Digiplus A7 e tocha de soldagem MIG Automática TBI com refrigeração à água e 3 m de comprimento. Como manipulador da tocha de soldagem foi utilizado o robô antropomórfico com 6 eixos MOTOMAN UP6, devido à sua flexibilidade e precisão. Para verificação da temperatura entre passes foi utilizado o termopar de contato S&E e para aquisição dos sinais elétricos o Sistema de Aquisição Portátil (SAP) foi utilizado, que tem frequência de aquisição de 5 kHz e erro de 3%.

Para as análises comparativas, foram utilizados a câmera IDT Y4-S2 e o sistema de iluminação a laser Cavitar CAVILUX HF nas filmagens de alta velocidade. A câmera Xiris XVC-1000 foi empregada como câmera de processo, sendo fixada por um Manfrotto, com o refletor Fresnel para iluminação, como demonstrado na Figura 28.

Para as imagens de macrografia foi utilizada a câmera da fabricante Canon, modelo Macro Canon EF 180 mm L USM, e foi utilizada iluminação laser e um filtro de 810 nm. Para os ensaios de raio-x foi utilizado um equipamento marca ERESO modelo MF4, que possui a potência de 300 kV, permitindo assim inspecionar peças de aço de até 3 pol de espessura. Através da complementação de um sistema de radiografia computadorizada é possível obter imagens com resolução de 25, 50 e até 100 microns. Por fim, para as análises de inclusões no interior dos *pads* foi utilizado o microscópio modelo AxioLab 5 da fabricante Zeiss e um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) modelo VEGA3 do fabricante TESCAN.

Figura 27 - Bancada final utilizada para os experimentos

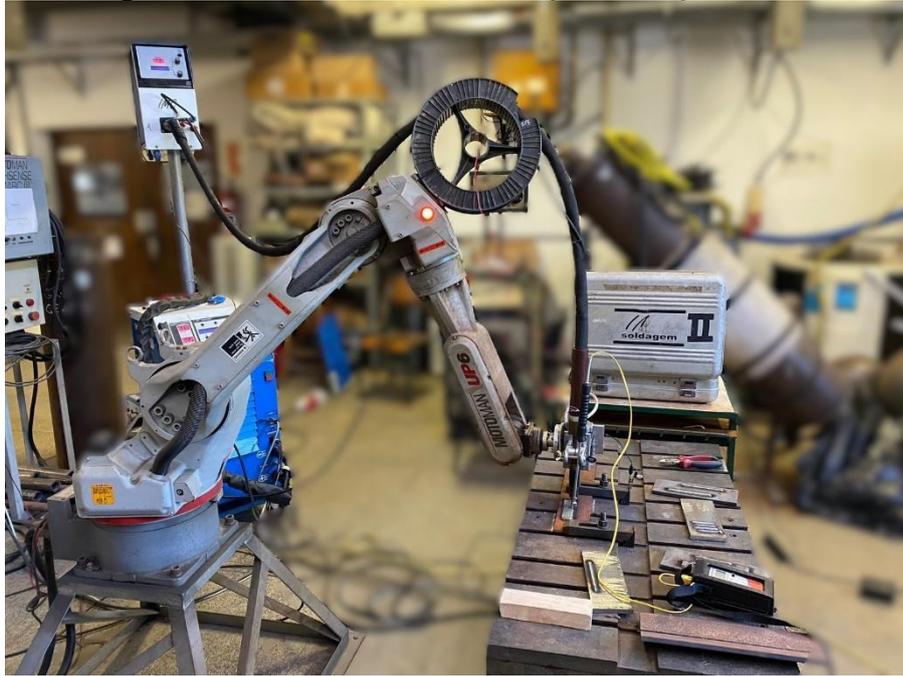


Figura 28 - Bancada utilizada para filmagens de processo



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados encontrados durante os procedimentos adotados neste trabalho.

4.1 VARIANTES DO MIG/MAG E ARAMES

Os ensaios com as variantes do processo MIG/MAG Convencional e Curto-Circuito-Controlado (CCC) em chapas com variação da DBCP de 10 a 32 mm, tiveram como resultado os cordões apresentados na Figura 29 e os oscilogramas das Figuras 30 a) e b).

Figura 29 - Resultados dos ensaios com curto-circuito convencional e controlado sinérgico

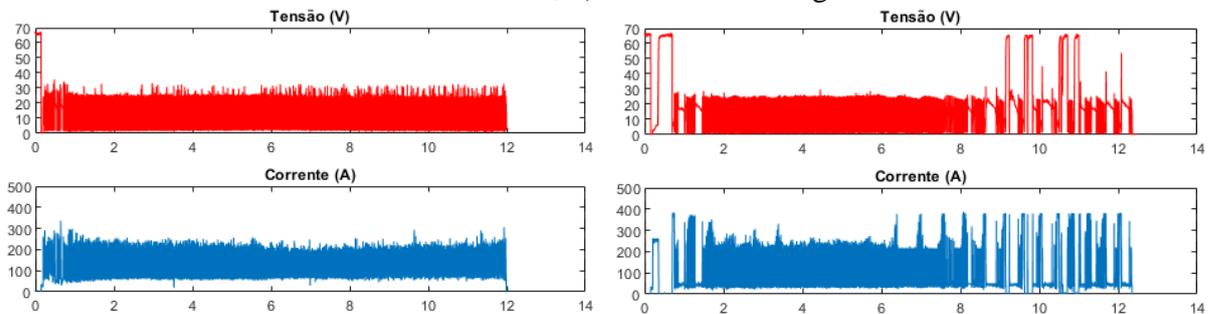


Como apresentado na Figura 29 e nos oscilogramas apresentados, a regularidade geométrica e processual foi comprometida para a condição de soldagem com curto-circuito controlado de menor energia ($V_a = 3 \text{ m/min}$ e $a = 0$), especificamente na condição de redução constante da DBCP. Em casos onde ocorre a redução constante do DBCP, ocorre também a redução da velocidade relativa de alimentação, fenômeno que repercute na energia disponível para fusão do arame que se torna insuficiente, forçando a ponta do eletrodo a encostar no fundo da poça de fusão (*sticking*) e formando um processo instável. Essa ocorrência foi facilmente corrigida com o aumento da intensidade da corrente ($V_a = 3 \text{ m/min}$ e $a = 10$).

Para o processo convencional a operação ocorreu de maneira regular independente da variação na DBCP, e não foi necessário o ajuste nos parâmetros elétricos, visto que a intensidade da corrente e frequência de destacamento variam de maneira adaptativa e como

uma resposta à altura de arco. Como é possível analisar visualmente, os cordões depositados por esse processo têm geometria regular ao longo de toda a sua extensão e não há a presença de respingos aderidos na chapa.

Figura 30 - Oscilogramas completos dos ensaios com $V_a = 3$ m/min com a) curto-circuito convencional e b) controlado sinérgico.

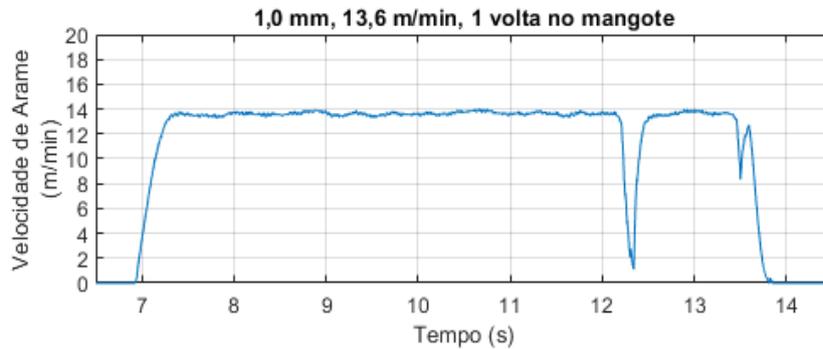


O programa sinérgico utilizado para o processo CCC possui uma pequena faixa de velocidades de alimentação, de 2 a 6 m/min parametrizadas somente para arame de 1,2 mm. A complexidade e rigidez da forma de onda desse processo dificultaram a sua utilização, devido a necessidade de realizar ajustes individualizados a cada aplicação e as limitações de tempo. A robustez apresentada pelo processo convencional e a sua facilidade de operação e parametrização auxiliaram na determinação do uso do processo convencional para o resto do projeto.

4.1.1 Avaliação da alimentabilidade de arames de 0,8 e 1,0 mm

Os ensaios testando a alimentabilidade de arames com diâmetro 1,0 mm e 0,8 mm forçando curvas no mangote tem seus resultados apresentados a seguir. O arame de 1,0 mm não apresentou instabilidades graves e nem muitas oscilações na alimentação, mesmo em situações com duas curvas forçadas. A partir da velocidade de 13,6 m/min, com uma taxa de deposição de 7,2 kg/h, o processo começou a apresentar irregularidades, como está registrado na Figura 31.

Figura 31 - Gráfico da alimentação de arame de 1,0 mm do ensaio com 1 volta no mangote

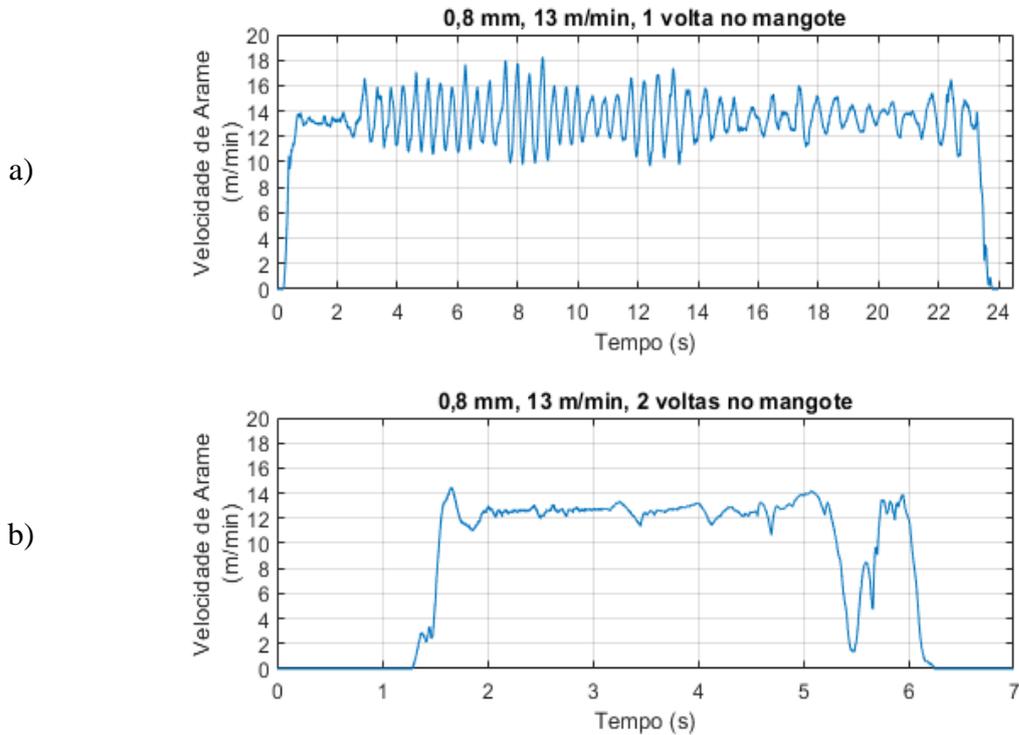


O arame de 0,8 mm também começou a apresentar instabilidades na velocidade de alimentação média de 13 m/min, com uma taxa de deposição de 3,1 kg/h. Essas instabilidades, visíveis nos oscilogramas da Figura 32, ocorrem devido ao fenômeno de micro travamentos, conhecido como *stick-slip*. Esse problema acontece quando o arame fica preso dentro do mangote, enquanto o alimentador continua a empurrá-lo. A energia se acumula durante o travamento e, ao ser liberada, todo o impulso acumulado faz com que o arame se mova rapidamente, gerando oscilações de grande amplitude na velocidade de alimentação.

Esse comportamento é especialmente prejudicial para o arame de 0,8 mm. Quando a velocidade do arame aumenta repentinamente, ele pode atingir o fundo da poça de fusão ainda em estado sólido, causando um *kick-back* (reco) em todo o sistema de alimentação. Devido à menor resistência do arame de 0,8 mm, esse movimento brusco pode levar ao amassamento do arame dentro do alimentador, e travando a alimentação.

Esses resultados serviram para encontrar valores críticos e limitantes de velocidade, além de mostrar o tipo de instabilidade que pode ser esperado em condições que atuam no limite do alimentador de arame e do mangote. Para velocidades baixas e intermediárias, de 4-9 m/min, a alimentação do arame de 0,8 mm não apresentou instabilidades. A possibilidade de utilizar esse arame, a uma taxa de deposição satisfatória e com correntes de pico comparativamente menores aos outros, justificou a sua utilização pelo resto do projeto.

Figura 32 - Gráfico da alimentação de arame de 0,8 mm do ensaio com a) 1 e; b) 2 voltas no mangote



4.2 SOLDAGEM EM SUPERFÍCIES OXIDADAS

Os ensaios de soldagem em peças que haviam sofrido elevada degradação por oxidação visaram indicar a condição superficial que possibilita a soldagem. Ao tentar iniciar o processo de soldagem na primeira peça, a camada expressiva de oxidação isolou eletricamente o arame eletrodo da peça, resultando na incapacidade de abrir o arco elétrico nessa superfície e impossibilitando a soldagem. Após a aderência de uma chapa limpa em uma das extremidades, foi possível obter o resultado da Figura 33, onde após a realização da abertura do arco o mesmo consegue se manter aberto desde que a trajetória de soldagem fosse próxima ao material da chapa ou de cordões recentemente depositados. O cordão depositado em cima dessa superfície não possui uma geometria regular e apresenta grandes discontinuidades por impurezas.

Figura 33 - Cordões soldados em peça com superfície extremamente oxidada e abertura do processo realizada na chapa limpa



Já na região da extremidade da peça, a qual apresentava uma camada não tão espessa de oxidação superficial, foi possível realizar a abertura do processo na própria peça, e o cordão depositado nessa condição possui regularidade superior e aparência satisfatória (Figura 34). Essa peça possui uma camada de oxidação fina na extremidade que vai aumentando em espessura ao se aproximar do centro. Portanto, foi testado iniciar o arco em uma região com uma camada pequena de oxidação e arrastá-lo até o arco não conseguir se sustentar devido à camada superior de oxidação. Ao contrário da peça anterior, o arco conseguiu se manter aberto e formar um cordão com geometria e deposição satisfatória, que pode ser visualizada na Figura 35.

Figura 34 - Cordões soldados em peças com superfície de degradação intermediária



Figura 35 - Cordão soldado em peça com superfície de degradação intermediária, buscando arrastar o arco aberto para regiões em pior condição superficial



Os ensaios utilizando as chapas preparadas com água e deixadas para oxidar por um mês apresentaram resultados positivos, com os cordões apresentados na Figura 36. Esse nível de oxidação não foi o suficiente para dificultar ou impossibilitar o início do processo e os cordões depositados sobre a superfície apresentaram boa regularidade geométrica e ausência de defeitos visíveis. A preparação dessas chapas possibilitou ensaios de deposição metálica sob superfícies com oxidação de uma maneira comparativa, fornecendo um indicativo de como o processo irá se comportar caso não seja possível realizar limpeza superficial no ambiente remoto.

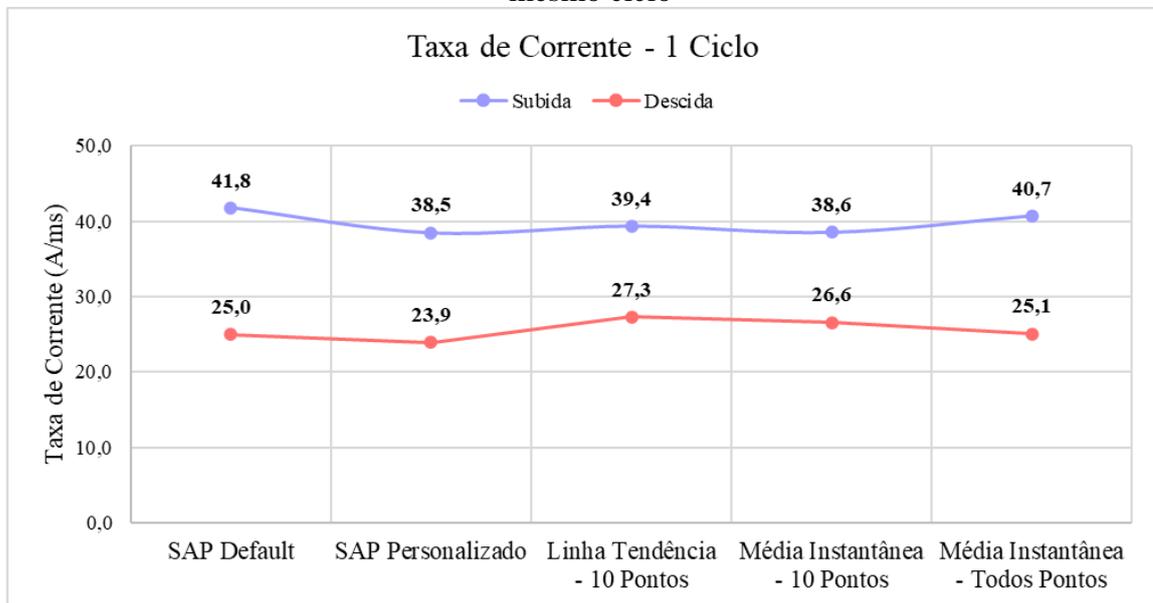
Figura 36 - Cordões soldados em superfície oxidada com água



4.3 ANÁLISE DE METODOLOGIAS DE CÁLCULO DE VARIAÇÃO DE TAXA DE CORRENTE

Os resultados dos cálculos da taxa de corrente estão apresentados na Figura 37, que corresponde aos resultados dos cálculos de taxa de corrente para um mesmo ciclo, realizados através das diferentes metodologias citadas na etapa de metodologia deste trabalho. Entre os diferentes métodos de cálculo verifica-se uma pequena diferença; uma variação de aproximadamente 3,5 A/ms para a subida e 2,5 A/ms para a descida.

Figura 37 - Comparação entre os diferentes métodos de cálculo da taxa de corrente para o mesmo ciclo



Com a distribuição dos valores calculados das taxas de corrente representada no gráfico da Figura 38 e 39, verificou-se que, ao considerar a taxa de subida e descida da corrente, o método SAP com o limiar de corrente personalizado apresentou a menor dispersão, indicando maior consistência dos resultados.

Sobrepondo o intervalo de confiança de 95% aos gráficos, constatou-se que existe uma pequena faixa onde a taxa de subida da corrente pode se encontrar, entre 40,5 e 39,1 A/ms, sugerindo uma estimativa precisa. No entanto, para a taxa de descida, os intervalos calculados pelos diferentes métodos não se sobrepõem, mostrando variações significativas entre os resultados, por exemplo os valores compreendidos na caixa do método SAP Default não pertencem ao mesmo conjunto de valores calculados pela Linha de Tendência.

Figura 38 - Comparação entre os diferentes métodos de cálculo da taxa de subida da corrente para 10 ciclos seguidos

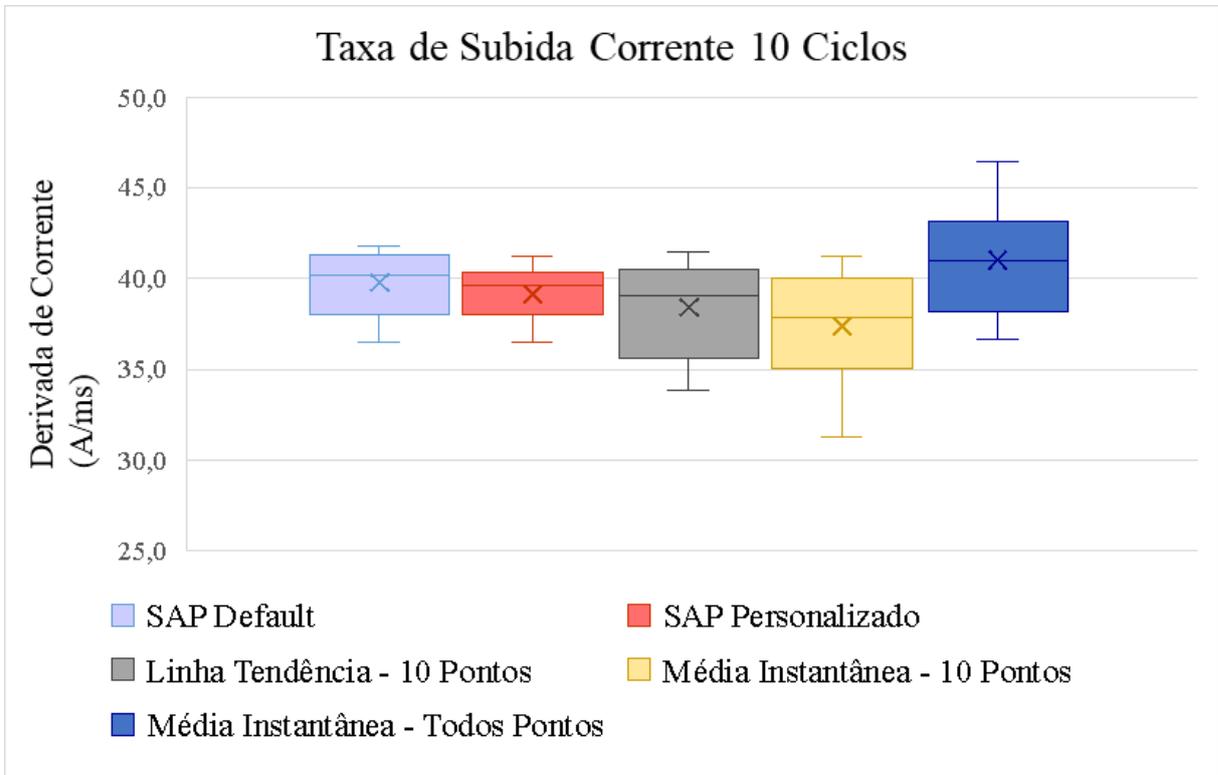
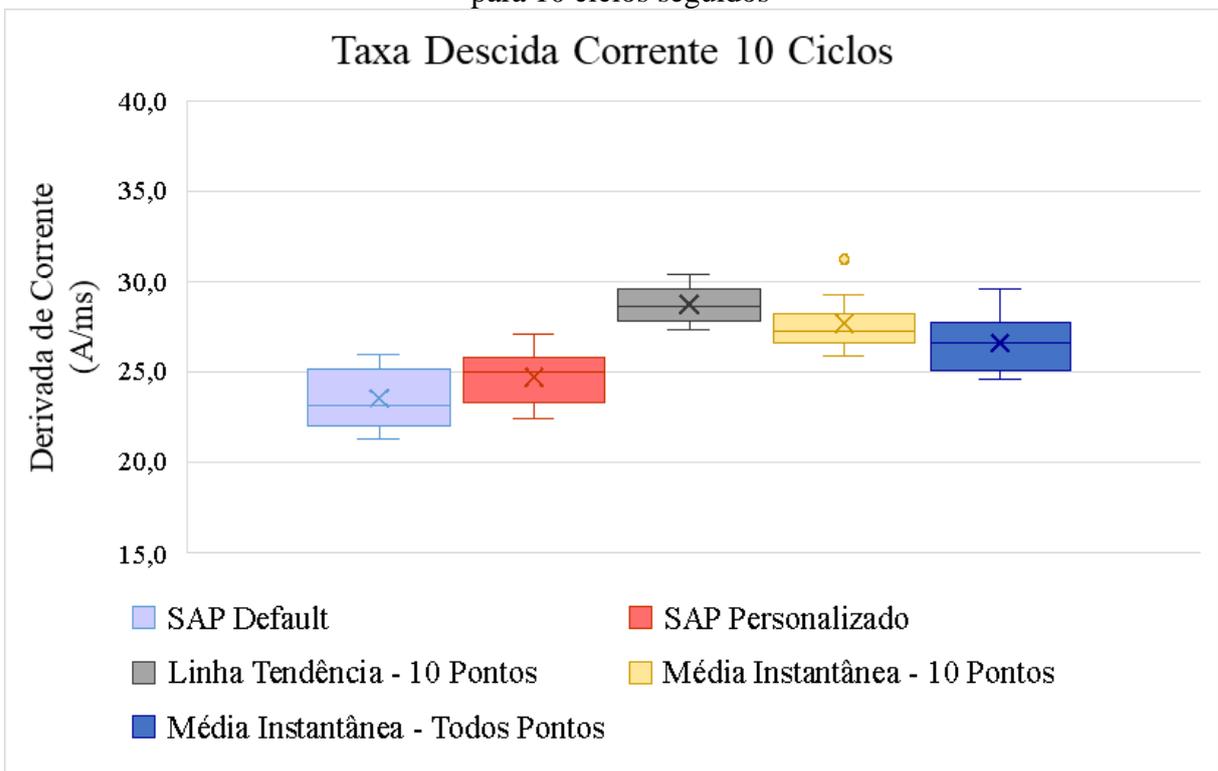


Figura 39 - Comparação entre os diferentes métodos de cálculo da taxa de descida da corrente para 10 ciclos seguidos



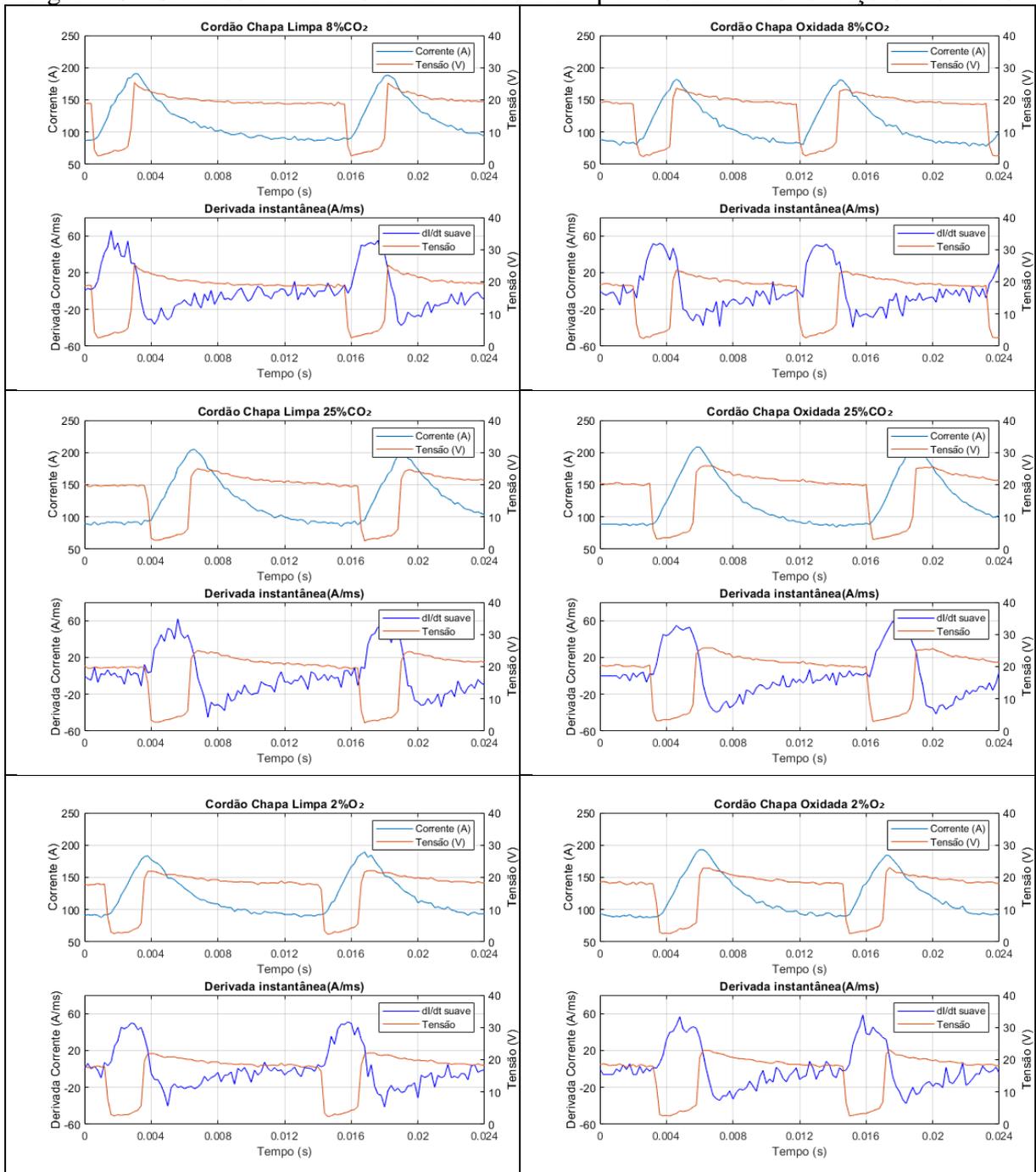
Isso pode ser explicado pelo comportamento menos linear da corrente durante a fase de decréscimo. A fase denominada "descida" começa com a reabertura do arco e se estende ao longo da fase de arco, onde ocorrem variações devido à aproximação do arame à poça metálica, à formação da gota e à alteração da altura do arco, impactando diretamente a resposta da corrente.

Ao analisar um oscilograma de transferência metálica por curto-circuito convencional, é possível destacar dois comportamentos distintos ao longo da descida: um inicial que se dá de maneira semelhante a uma reta linear e um consecutivo que se dá mais como uma curva. A menor dispersão de dados observada nos cálculos realizados com as metodologias de "Linha de Tendência - 10 Pontos" e "Média Instantânea - 10 Pontos" pode ser atribuída à menor quantidade de pontos utilizados para o cálculo. Isso resulta em uma representação predominantemente do comportamento linear, o que também explica os valores superiores obtidos por esses métodos. Durante o tempo de curto-circuito (subida), existe uma pequena variação na resistência do sistema devido a estrição da ponte metálica, resultando em um comportamento mais regular e previsível da corrente na subida do que na descida. A variação na fase de arco é maior, devido ao aumento da altura significativo durante a reabertura, saindo do curto até a fase de arco.

Os gráficos que mostram os valores instantâneos da taxa de corrente, apresentados na Figura 40, não exibem um comportamento constante na taxa de variação de corrente. Isso ocorre mesmo em regiões específicas, como no final do curto-circuito e logo após a reabertura do arco, onde seria esperado um patamar de valores, já que o oscilograma apresenta um comportamento próximo ao de uma reta.

Representar a taxa de corrente como um único valor médio para as fases de subida e descida pode não ser a abordagem mais adequada, especialmente considerando as limitações dos equipamentos de aquisição utilizados. A dificuldade em atingir um patamar estável pode ser atribuída aos "ruídos" presentes nos dados, que podem ser resultado da frequência de aquisição do sistema. No caso analisado, foi utilizado o SAP com uma frequência de aquisição de 5 kHz. Para melhorar a representatividade dos dados nos gráficos, seria interessante aplicar ferramentas de suavização de dados. Ao comparar os resultados obtidos com aqueles apresentados no trabalho de Modenesi (2009), percebe-se a ausência de ruídos nos dados de referência, o que facilita a visualização e interpretação.

Figura 40 - Gráficos da taxa instantânea de corrente para as diferentes condições ensaiadas



4.4 DEPOSIÇÃO DE CAMADAS COM ARAME DE 0,8 MM E DIFERENTES GASES

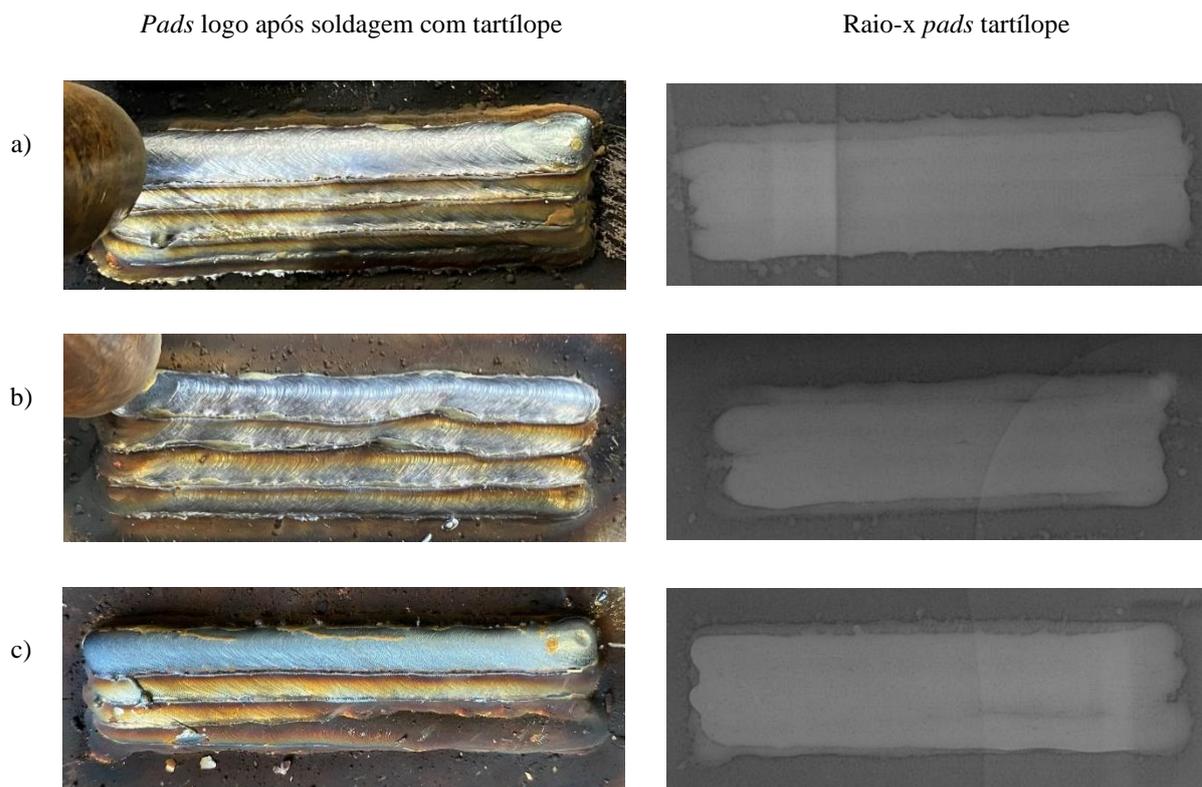
4.4.1 Soldagem com Tartilope

A visão superior dos *pads* fabricados utilizando o tartilope e os resultados de raio-x estão apresentados na Figura 41. Essas imagens foram tiradas logo após a soldagem e utilizadas

para a inspeção visual, que revela irregularidades geométricas tanto de cordões individuais quanto dos *pads* inteiros. A imprecisão da velocidade de soldagem e distância entre centros contribuiu para essas irregularidades, sendo incapaz de separar os seus efeitos dos gases utilizados.

Ao avaliar as concentrações de sílica retida nas laterais dos cordões após a soldagem, observou-se que a mistura de gás com 25% de CO₂ formou um volume maior do composto. As consequências dessa quantidade de sílica podem ser vistas na Figura 41.b, onde os cordões apresentaram oscilações e falhas de união nas regiões de interseção. Embora todos os gases utilizados tenham contribuído para a formação de sílica, a quantidade foi menor nos *pads* fabricados com outros gases.

Figura 41 - Fotos dos *pads* logo após a soldagem com o tartílope e resultados de raio-x, a) 8% CO₂; b) 25% CO₂ e; c) 2%O₂



Os resultados dos ensaios de raio-x não apontaram indicações que pudessem ser associadas com falhas de fusão no interior dos *pads*, o que sugere que a fusão entre os cordões nas duas camadas foi homogênea, já que eventuais falhas apareceriam como linhas contínuas na interseção dos cordões. As oscilações observadas na análise visual foram corrigidas com a

adição de mais passes de soldagem. Além disso, os resultados do raio-x não indicam porosidade nos *pads* fabricados.

Utilizando os mesmos parâmetros de soldagem para todos os gases, verificou-se que os cordões soldados com 25% de CO₂ apresentaram uma largura 16% maior em comparação com os outros gases. Isso pode ser atribuído à maior concentração de gás ativo, que resultou em maior energia de soldagem para essa mistura, como será discutido de forma mais detalhada na sequência.

4.4.2 Soldagem Robô Antropomórfico

A Tabela 9 apresenta os valores médios obtidos para cada cenário analisado em chapa limpa. Observando a média dos sinais elétricos, nota-se que a mistura gasosa com 25% de CO₂ apresentou valores de tensão média e potência significativamente maiores em comparação aos demais, devido à tensão regulada superior para essa condição de soldagem. Esse comportamento é atribuído ao potencial de ionização da mistura, que exige maior energia para promover, inicialmente, a dissociação e, em seguida, a ionização. Além disso, os efeitos físicos causados pela concentração de CO₂ no arco também contribuem para esses resultados. Apesar disso, a maior diferença nos valores médios foi observada na tensão e na potência, enquanto a corrente média apresentou variação relativamente pequena entre os diferentes gases, assim como a frequência de destacamento e a corrente eficaz. Entre a mistura com 8% de CO₂ e a com 2% de O₂, a diferença na tensão foi muito menor e não resultando em variações significativas na potência média

Tabela 8 - Valores das correntes de soldagem chapa limpa

Mistura Gasosa	Tensão Regulada (V)	Tensão Média (V)	Corrente Média (A)	Potência (kW)	Frequência Destacamento (Hz)	Corrente Eficaz (A)
8% CO ₂	21,5	17,26	114,58	1,96	61,11	116,75
25% CO ₂	23,5	19,05	118,49	2,23	60,89	123,97
2% O ₂	21,5	16,99	116,14	1,95	57,72	120,24

Ao analisar os sinais elétricos médios das chapas com oxidação, apresentados na Tabela 10, observa-se um comportamento semelhante ao descrito anteriormente, em que a mistura gasosa com 25% de CO₂ apresentou valores de tensão média e potência significativamente maiores que os demais. Destaca-se também que a menor frequência de

destacamento foi registrada na soldagem com 2% de O₂, enquanto a maior ocorreu com 8% de CO₂. Esse resultado será explorado e comentado em maior detalhe posteriormente, em relação ao tamanho das gotas.

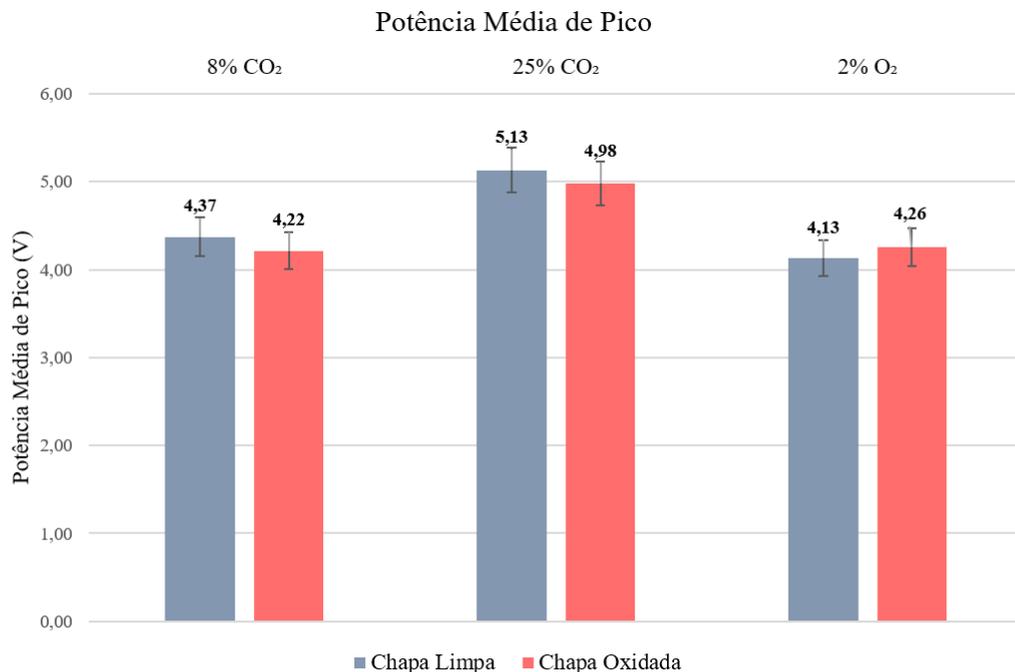
Tabela 9 - Valores das correntes de soldagem chapa oxidada.

Mistura Gasosa	Tensão Regulada (V)	Tensão Média (V)	Corrente Média (A)	Potência (kW)	Frequência Destacamento (Hz)	Corrente Eficaz (A)
8% CO ₂	21,5	16,82	110,60	1,85	72,70	114,86
25% CO ₂	23,5	18,66	114,60	2,12	67,50	120,30
2% O ₂	21,5	16,54	114,20	1,87	61,91	118,51

Comparando os resultados entre soldagem em chapa limpa e chapa oxidada, foram observadas algumas diferenças nos valores médios, apesar das mesmas condições de regulagem. O menor valor de tensão pode ser atribuído à maior frequência de curto-circuito na soldagem de chapas oxidadas, embora, nesse caso, fosse esperado um aumento na corrente média devido à maior ocorrência de picos. Com exceção dos valores de frequência de destacamento, todos os outros apresentaram uma leve redução, sugerindo que a oxidação superficial das chapas influenciou os sinais elétricos. Esse efeito pode ser explicado pela natureza isolante da camada de oxidação, que atua como uma resistência adicional a ser superada pelo sistema.

Ao longo do processo de soldagem verificou-se que o número de respingos foi superior para as operações utilizando o gás 25% de CO₂ e para as operações em chapa com oxidação. Buscando explicar essa ocorrência, foi calculada a potência média durante o pico da corrente, os valores estão apresentados no gráfico da Figura 42. Maior intensidade de potência, principalmente no momento de reabertura do arco, pode ser responsável por elevada oscilação da poça metálica, desestabilizando o processo e aumentando a formação de respingos. A potência calculada para os ensaios em chapas com oxidação superficial foi inferior aos ensaios em chapa limpa para os gases com 8% e 25% de CO₂. Nessa condição, os respingos, oscilações na poça e instabilidades constatadas podem ser melhor explicadas pela reação química do gás de proteção e metal líquido com os elementos presentes na camada de óxidos, além de demandar certa energia para realizar a limpeza e vaporização dos mesmos.

Figura 42 - Gráfico com os valores de potência média de pico dos *pads* soldados em chapa limpa e chapa com superfície oxidada



Os resultados das taxas de subida e descida da corrente, calculados pela metodologia escolhida (SAP com limiar personalizado), estão apresentados nas Tabelas 11 e 12, respectivamente. Apesar da pequena perda de potência observada devido à superfície oxidada, as taxas permaneceram constantes para cada tipo de gás. No entanto, ao utilizar os mesmos valores de ks/kd para todos os gases, o comportamento para o gás com 25% de CO₂ foi diferente. Isso destaca a importância de não se utilizar ks/kd como parâmetro universal. A principal diferença para essa condição foi a tensão de referência parametrizada, que foi superior. Esse comportamento é coerente, já que a corrente segue a tensão, e um maior diferencial de tensão (em relação à referência) aumenta as taxas de subida e descida. Para os gases e materiais testados, essas taxas foram satisfatórias para garantir processos estáveis, com mínima ocorrência de respingos. A taxa de descida após o curto foi lenta o suficiente para evitar oscilações extremas, os valores para a fase de curto obtidos foram condizentes com os da referência (DUTRA, 2008).

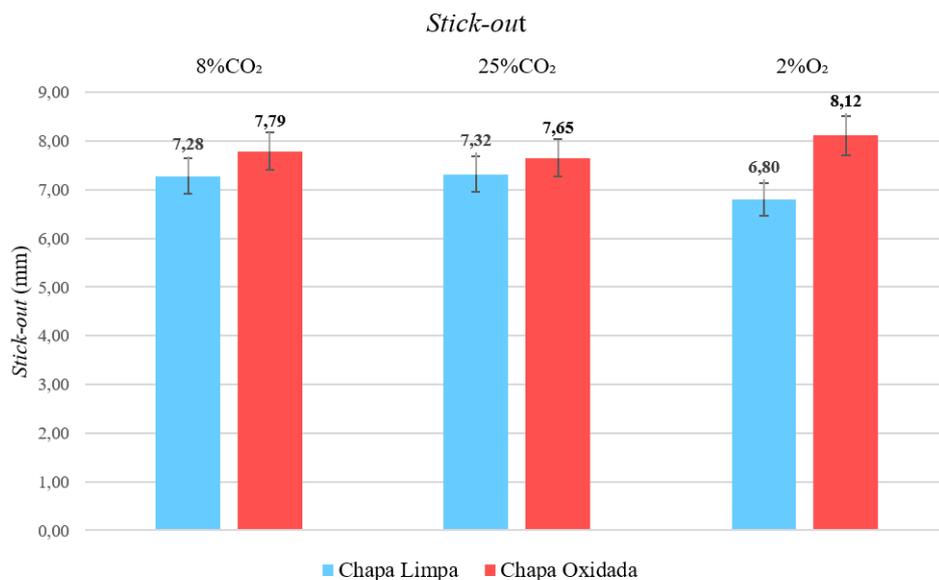
Tabela 10 - Valores das taxas de subida da corrente de soldagem em A/ms

Mistura Gasosa	8% CO ₂	25% CO ₂	2% O ₂
Chapa Limpa	41,40	45,80	40,00
Chapa Oxidada	41,30	45,30	40,20

Tabela 11 - Valores das taxas de descida da corrente de soldagem A/ms

Mistura Gasosa	8% CO ₂	25% CO ₂	2% O ₂
Chapa Limpa	24,30	27,90	24,70
Chapa Oxidada	23,40	27,60	24,00

Com os resultados das filmagens realizadas com câmera de alta velocidade, foi possível observar que, nos ensaios com chapa oxidada, o *stick-out* visível aumentou, resultando em uma redução da altura do arco para o mesmo gás utilizado (Figura 43). No entanto, esses resultados não foram compatíveis com a redução na corrente média e na potência média de pico observadas nos ensaios com chapas oxidadas.

Figura 43 - Gráfico de barras com os valores de *stick-out* visível medidos a partir das filmagens de alta velocidade

Com as filmagens, também foi possível medir o tamanho das gotas, cujos valores estão apresentados na Tabela 13. Observou-se um diâmetro maior para o gás com O₂, condizente com a menor frequência de destacamento das gotas nesse caso. Já o tamanho das gotas para os gases com CO₂ não segue essa mesma proporção, o que pode ser explicado pela maior vaporização metálica do arame devido à temperatura mais elevada ou por micro instabilidades na alimentação. Além disso, nos ensaios com chapas oxidadas, foi verificada uma pequena redução no tamanho das gotas.

Tabela 12 - Tamanho de gota medido a partir das filmagens de alta velocidade.

Gás utilizado	Chapa Limpa			Chapa Oxidada		
	8%CO ₂	25%CO ₂	2%O ₂	8%CO ₂	25%CO ₂	2%O ₂
Tamanho de Gota (mm)	1,18	1,16	1,23	1,13	1,11	1,19
Frequência Destacamento (Hz)	61,11	60,89	57,72	72,70	67,50	61,91

A filmagem de alta velocidade revelou a ocorrência de micro travamentos do arame de soldagem, o que provocou variações no tamanho da gota e na altura do arco. Após esses travamentos, o material acumulado dentro do conduíte foi impulsionado, resultando em uma velocidade relativa momentaneamente superior à estipulada pelo alimentador. Inconsistências na alimentação de arame são esperadas no processo MIG/MAG, especialmente com o uso de mangotes longos, tracionadores afastados da tocha e arames de diâmetro reduzido. Essas variações podem levar à desestabilização do processo e à incorreta parametrização. No caso analisado, a alimentação intermitente não comprometeu a regularidade da solda, e a velocidade de alimentação relativa, calculada por meio da filmagem de alta velocidade, foi de 8,19 m/min, com um desvio padrão de 0,4 — um valor superior ao medido pelo SAP (7,8 m/min).

As gravações de alta velocidade não mostraram diferenças significativas na ocorrência ou geometria de respingos, nem variações na geração de fumos entre os diferentes gases ou entre a soldagem em chapa limpa e oxidada.

4.4.2.1 *Análise Visual*

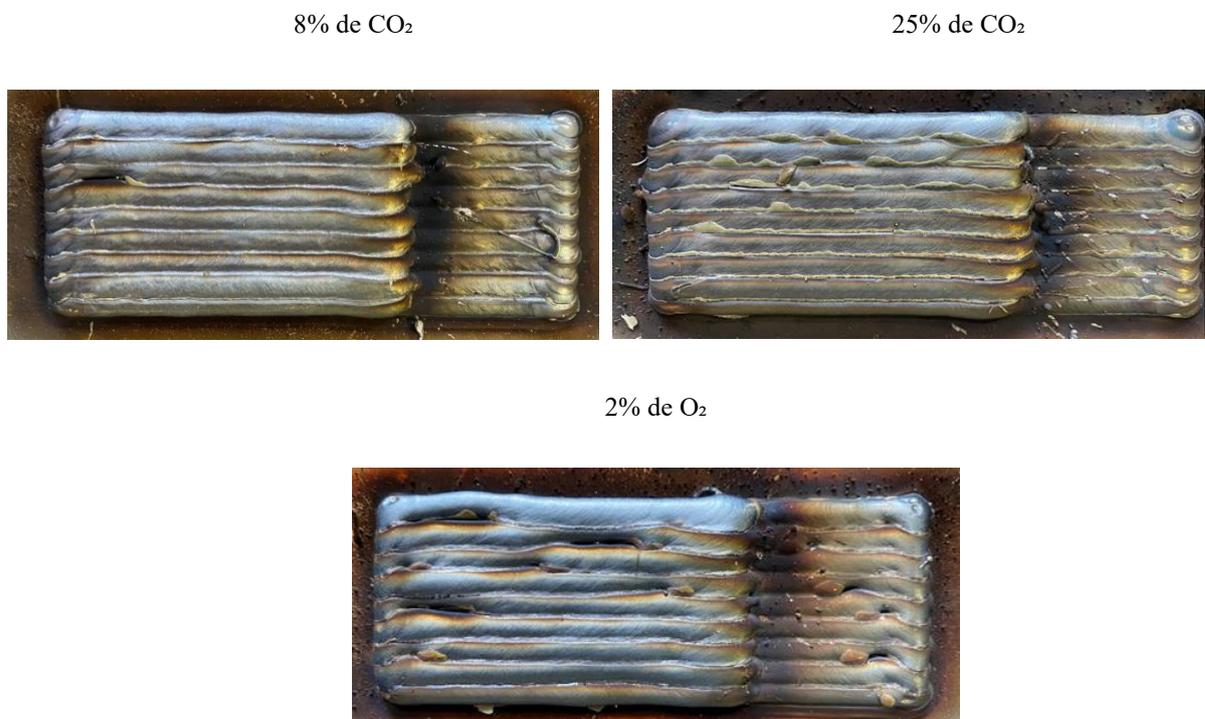
A visão superior dos *pads* depositados está apresentada na Figura 44. Essas imagens foram tiradas logo após a soldagem e utilizadas para a inspeção visual, que revela uma maior regularidade geométrica na união entre os cordões e uma menor ocorrência de falhas ao utilizar a mistura com 8% de CO₂. Outro aspecto notável é a maior quantidade de sílica visível no corpo de prova soldado com 25% de CO₂, que tende a se acumular na interface entre os cordões, principalmente na região dos flancos, do início ao final do cordão. Embora não aparente na imagem, foi observado durante a operação que a mistura com 8% de CO₂ apresentou um comportamento de formação e ancoramento da sílica semelhante, tanto em formato quanto em coloração, porém em menor volume.

O *pad* fabricado com 2% de O₂ apresentou uma quantidade intermediária de sílica, mas distinta em relação à forma como ela permanece após a soldagem, aparecendo como "ilhas"

distribuídas na interface de sobreposição dos cordões e com uma coloração mais alaranjada. Essa diferença na posição e no volume concentrado de sílica se mostrou prejudicial, pois o *pad* soldado apresentou pontos com falta de fusão e inclusões, resultantes da deflexão da poça metálica. Esse fenômeno será abordado em profundidade nas filmagens do processo, a seguir.

Em todos os ensaios realizados, notou-se uma tendência de o volume da sílica aumentar a cada passe. A sílica que não fica retida na superfície da interseção entre os cordões é carregada por meio do metal líquido e incorporada a concentração de sílica sendo formada, por isso os defeitos são mais recorrentes no final do cordão e após alguns passes.

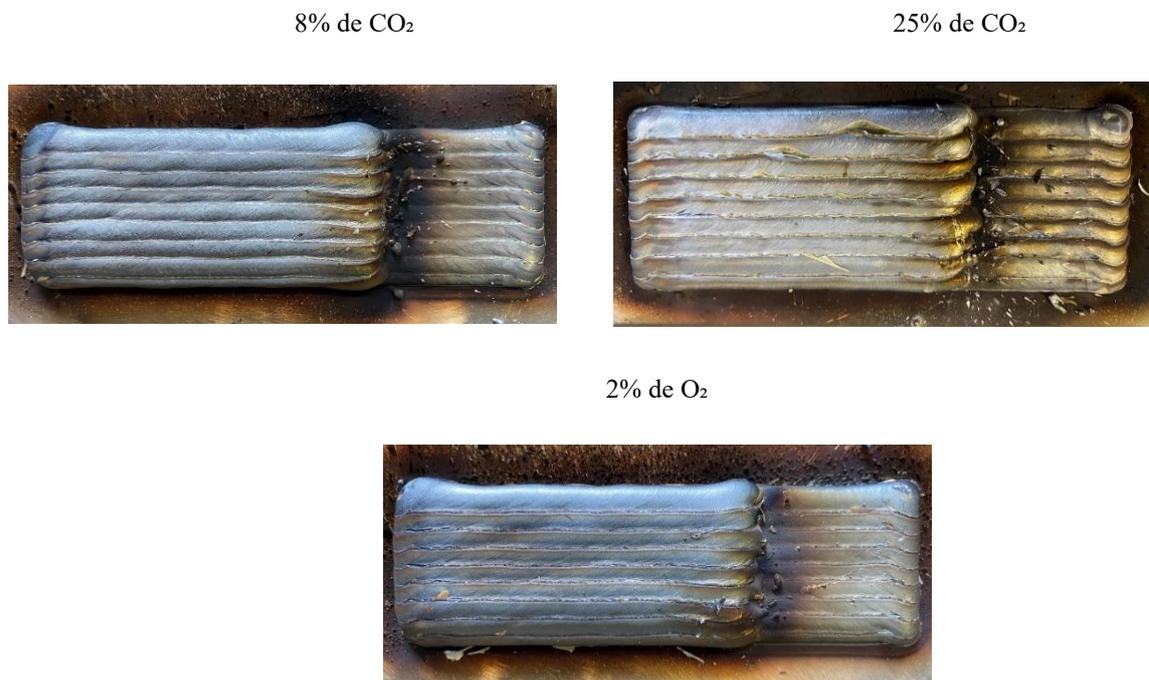
Figura 44 - Fotos dos *pads* logo após a soldagem com o robô, a) 8% CO₂; b) 25% CO₂ e; c) 2% O₂



Os *pads* apresentados acima possuem uma distância entre os centros dos cordões fixada em 4,3 mm. Com o objetivo de reduzir o número de defeitos, considerando as diferenças geométricas entre os gases e ajustando a posição para que a região mais quente do arco facilite a fusão e a expulsão da sílica, novos *pads* foram fabricados, conforme mostrado na Figura 45. Esses novos *pads* seguiram uma distância entre centros de cordões de 67,7% da largura dos cordões. Para os gases com 2% de O₂ e 8% de CO₂, a distância utilizada foi de 3,3 mm, enquanto para o gás com 25% de CO₂ foi de 4,0 mm.

O ajuste na distância entre os centros dos cordões apresentou resultados visuais positivos para todos os gases. A regularidade geométrica da união entre os cordões foi aprimorada, a quantidade de sílica visível reduziu significativamente, e os defeitos de fusão entre os cordões foram eliminados. Apenas o *pad* soldado com 25% de CO₂ apresentou irregularidades na geometria dos cordões, provavelmente devido ao maior volume de sílica formado com esse gás. A maior quantidade de oxigênio disponível no gás pode explicar essa formação mais acentuada de sílica, uma vez que, após a dissociação do gás, o oxigênio reage com o silício presente no metal da chapa e no arame durante o processo de deposição.

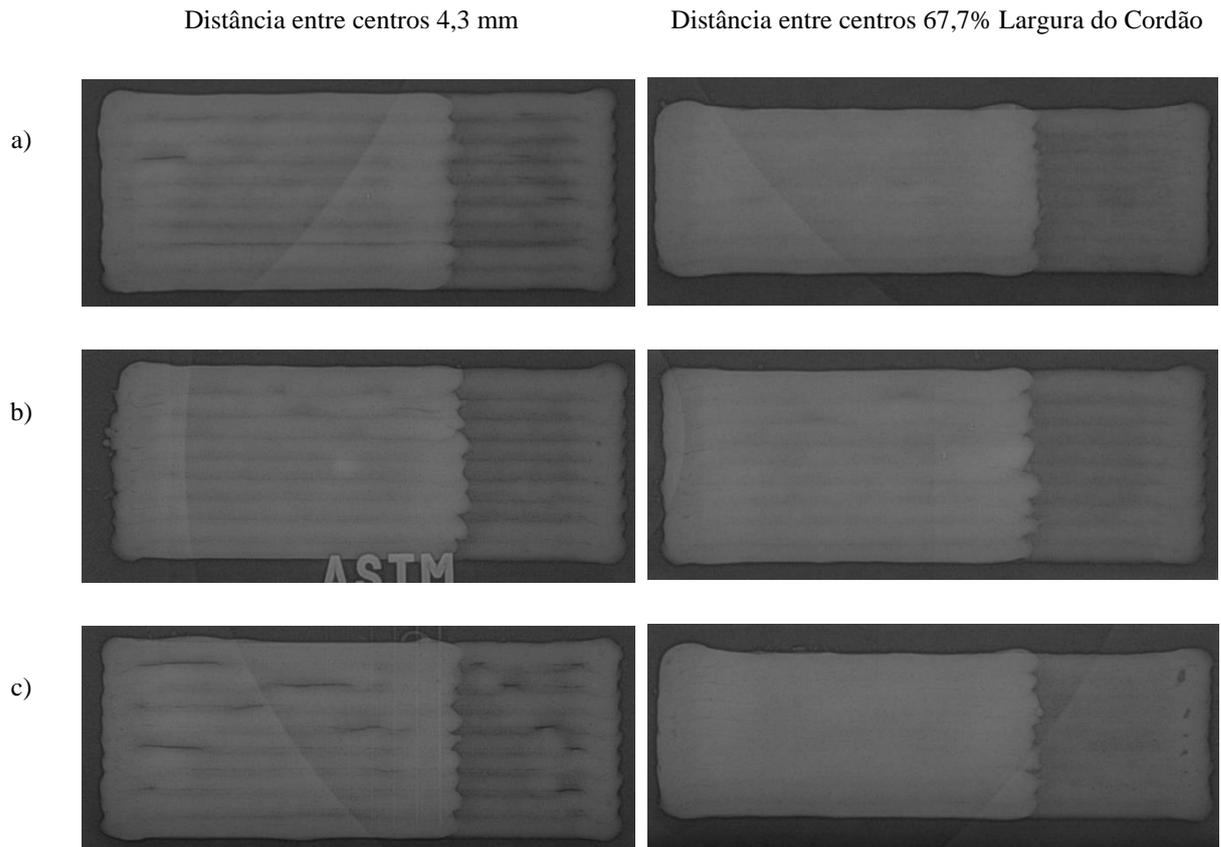
Figura 45 - Fotos dos *pads* logo após a soldagem com o robô com ajuste da distância entre centros, a) 8% CO₂; b) 25% CO₂ e; c) 2% O₂



Os resultados dos ensaios de raio-x estão apresentados na Figura 46. Ao analisar as imagens, é evidente a maior uniformidade dos *pads* fabricados com a distância entre centros ajustada. Nos *pads* com distância fixa de 4,3 mm entre os centros, a análise por raio-x não destacou a presença de inclusões ou poros entre os cordões, exceto pelos defeitos já visíveis na inspeção visual. Isso reforça o entendimento de que a sílica formada durante o processo é vaporizada ou fundida, sendo conduzida para fora da poça metálica, seja para as superfícies laterais ou superiores, sem ser retida como uma inclusão no metal de solda.

O ensaio também evidenciou a geometria mais irregular e ondulada dos cordões, com linhas mais escuras nas interseções. Nos *pads* com distanciamento ajustado, como a união entre os passes foi mais regular, a região de interseção apresentou menor intensidade nas linhas escuras e a ausência de defeitos.

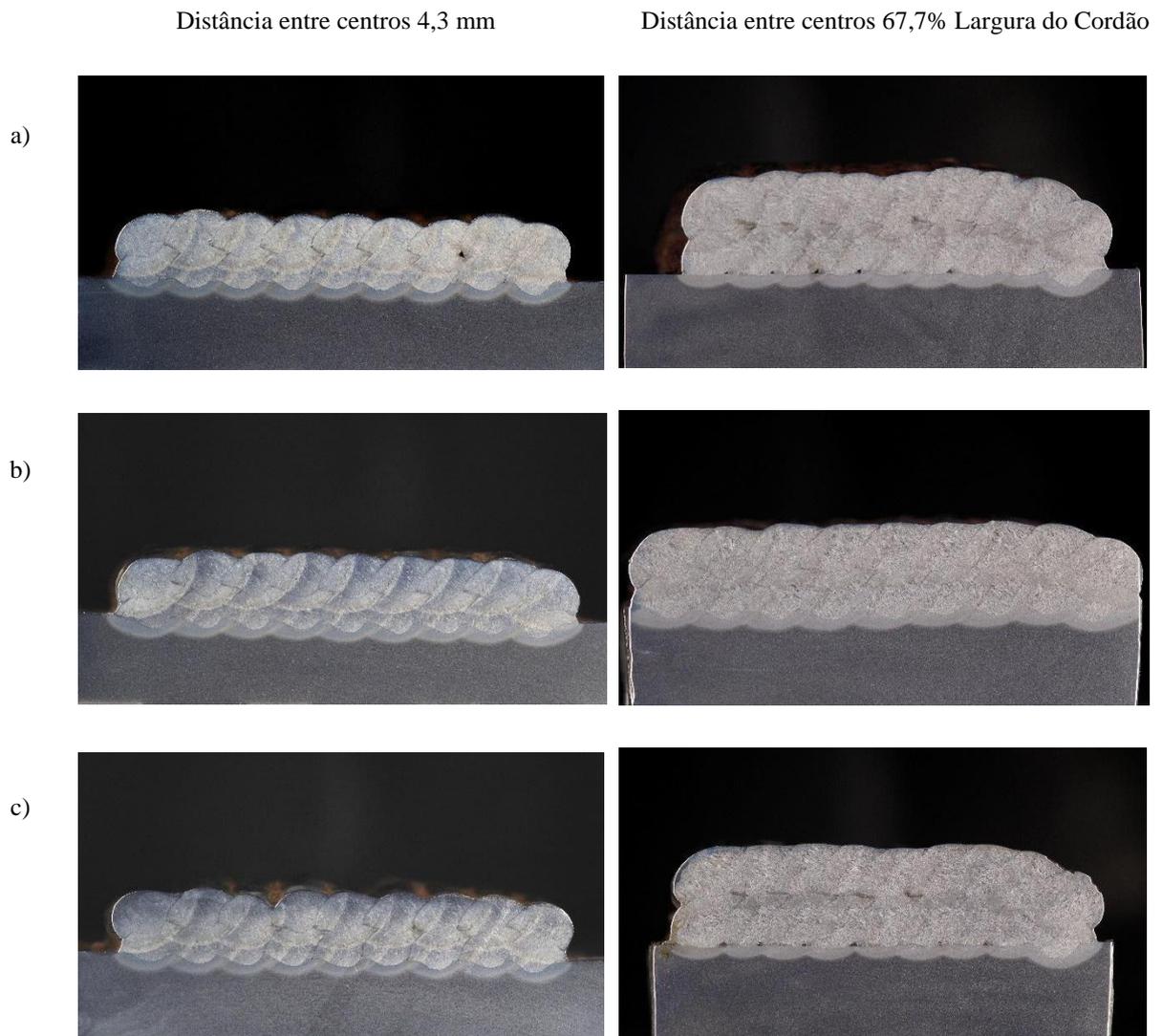
Figura 46 - Resultados de raio-x dos *pads* soldados com o robô em chapa limpa, a) 8% CO₂; b) 25% CO₂ e; c) 2%O₂



Apesar dos ensaios de raio-x não indicarem a presença de descontinuidades, os resultados das macrografias, apresentados na Figura 47, mostram que, nos *pads* soldados com 8% CO₂ e 2% O₂, houve falta de fusão e a permanência de concentrações de sílica entre a maioria dos cordões sobrepostos em ambas as camadas. O posicionamento dessas inclusões de sílica, na interseção entre um cordão e o outro, contribuíram para mascarar a sua presença nos ensaios de raio-x, visto que as linhas mais escuras reveladas aparentam fazer parte da geometria natural do cordão. A macrografia transversal exibe também a maior oscilação superficial do revestimento ao utilizar a distância entre centros fixa, comparado com o parâmetro dimensional ajustado.

As peças soldadas com 25% de CO₂, que visualmente apresentaram maior formação de sílica, não mostraram inclusões visíveis entre os cordões e tiveram boa fusão entre os passes. As concentrações de sílica formadas ao longo do processo influenciam apenas na regularidade geométrica dos cordões, resultando em vales superficiais rasos, que podem ser corrigidos com mais passes ou adição pontual de material.

Figura 47 - Resultados de macrografia da seção transversal dos *pads* em chapa limpa comparando a distância entre centros, a) 8%CO₂, b) 25%CO₂, e c) 2%O₂



As peças fabricadas com o distanciamento entre passes ajustado apresentam um resultado similar, com inclusões grandes de sílica entre os passes em ambas camadas para as condições de soldagem com os gases 8% CO₂ e 2% O₂, mesmo com a formação aparente de sílica tendo indicado reduzida quantidade. A fusão entre os passes e a regularidade superficial

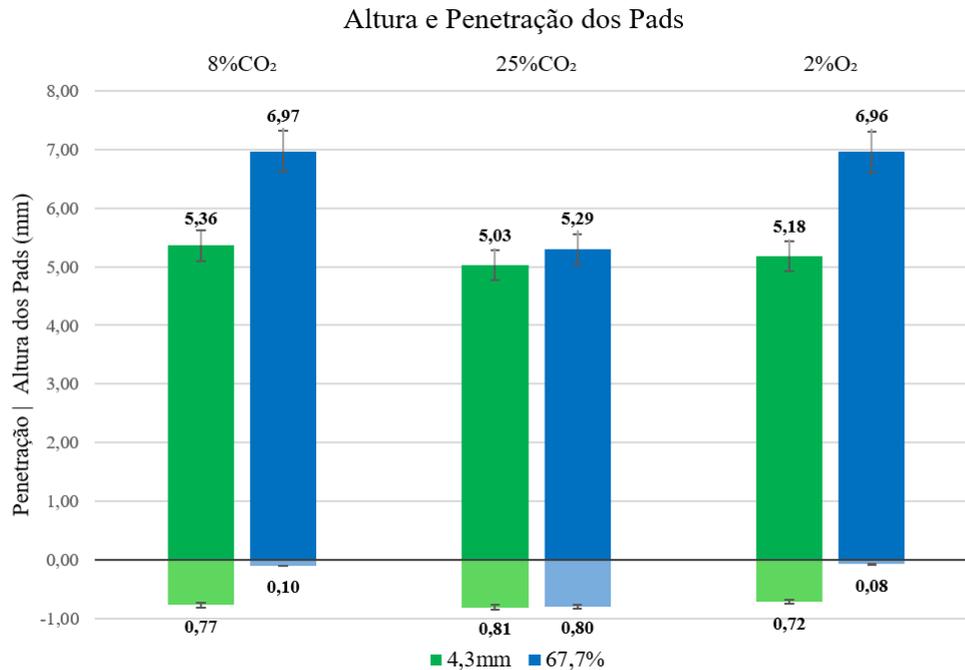
nesses *pads* foi superior, no entanto, a fusão entre camadas e com a chapa foi comprometida, apresentando superior número de defeitos e baixíssima diluição.

A peça soldada com gás 25%CO₂, apresentou melhorias em relação à condição anterior, com melhor regularidade dos cordões, maior aderência entre passes e menor oscilação na superfície da camada. A maior formação de sílica visível após a soldagem é atribuída ao teor de oxigênio no gás. No entanto, a quantidade de sílica, em comparação com os outros gases, pode estar sendo superestimada, já que essa foi a única condição em que não houve grandes inclusões retidas entre os cordões.

A melhor eliminação de sílica do interior do *pad* com o uso de 25% de CO₂ pode ser explicada pela maior energia demandada para a soldagem com esse gás. Uma explicação é que o arco, com maior energia, ao entrar em contato com a sílica sólida na superfície do cordão, faz com que ela seja rapidamente vaporizada, fundida ou expelida, sem causar a deflexão do arco devido ao isolamento elétrico do óxido. Outra hipótese é que, durante a soldagem, devido à maior energia, o metal da poça permanece no estado líquido por mais tempo, permitindo que a sílica líquida flutue até a superfície e seja removida da região de interseção. Além disso, a geometria do cordão, com menor altura e um ângulo de molhabilidade mais favorável, também facilita a expulsão de impurezas.

Os *pads* fabricados com os gases 8% CO₂ e 2% O₂ apresentaram geometrias muito similares, devido à distância entre passes menor nesses dois casos, sendo que a altura foi mais de 1 mm superior ao soldado com gás 25% de CO₂ (Figura 48). Essa diferença de altura não apresenta grande relevância para a aplicação. A medição geométrica mais crítica foi a penetração, que ao realizar o ajuste na distância entre centros para aperfeiçoar a regularidade superficial e mitigar a formação de sílica, promoveu uma redução brusca na penetração o que compromete a integridade do *pad*, que fica mal aderido à chapa. Uma das desvantagens de utilizar o arame com pequeno diâmetro, é que o mesmo opera com correntes médias e potência relativamente baixas, fazendo com que a deposição fique mais suscetível a falta de penetração em uma chapa que não é fina.

Devido a geometria e propriedade dos *pads* com 25% de CO₂, o mesmo não apresentou perda de fusão com a chapa devido ao ajuste de posição. Comparativamente, a variação de distância entre 4,3 mm e 67,7% da largura para a condição 25%CO₂ foi menor, devido à maior largura do cordão e penetração praticamente invariável, o que explica o aumento menos expressivo na altura.

Figura 48 - Gráfico dos *pads* soldados em chapa limpa

4.4.2.2 Resultados de soldagem em chapas oxidadas

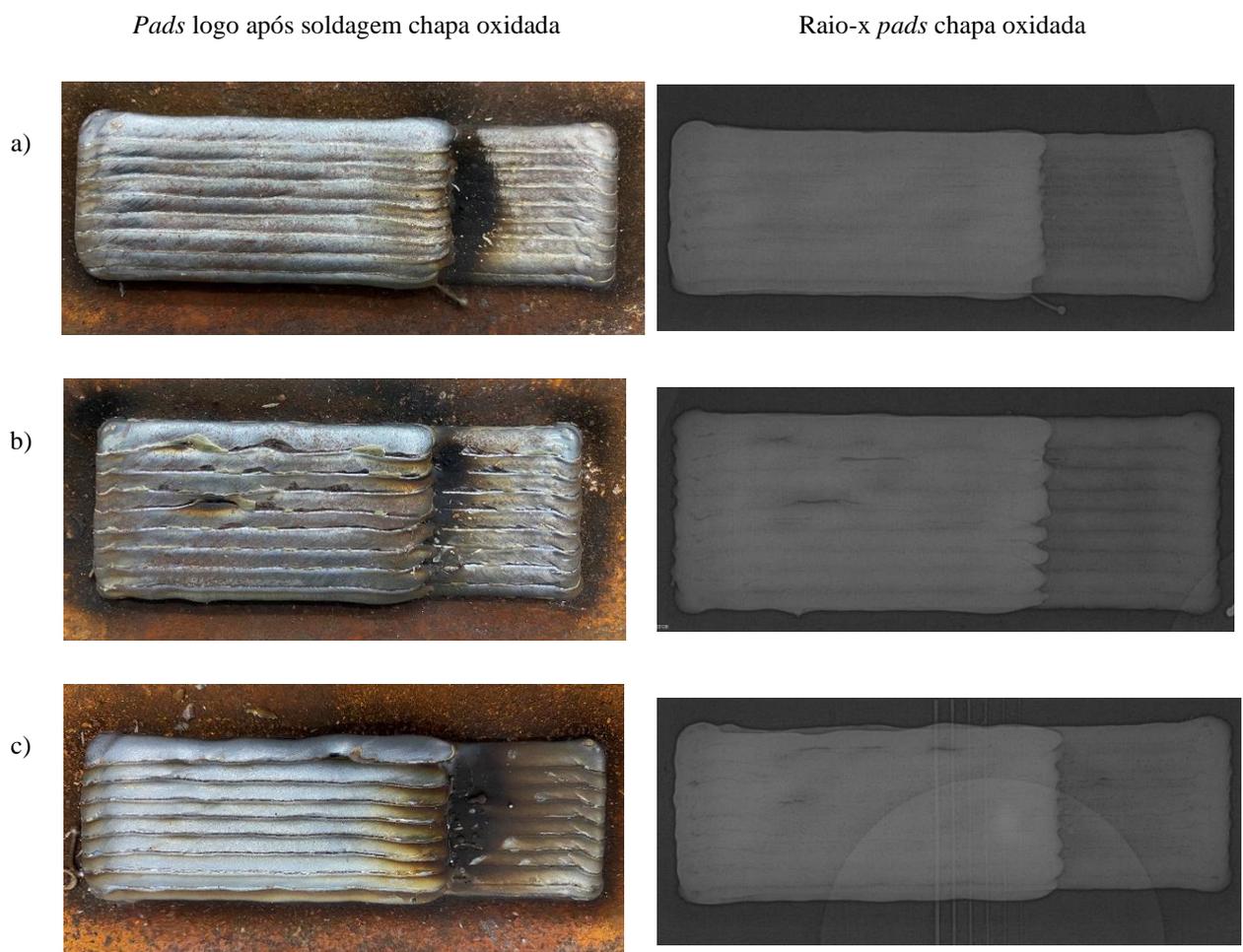
A inspeção visual foi realizada logo após a soldagem dos *pads*, fabricados sobre chapas oxidadas, e o resultado é mostrado na Figura 49. Nessa condição de oxidação superficial, o processo de soldagem mostrou sinais elétricos de boa regularidade, com fácil abertura do arco e boa estabilidade. No entanto, visualmente, a qualidade dos *pads* fabricados diminuiu em relação à chapa limpa. Apesar de ter sido mantida a mesma configuração do ensaio anterior, com a distância entre centros ajustada, a regularidade geométrica dos cordões foi comprometida.

Proporcionalmente, a formação de sílica visível aumentou nos casos de soldagem com 25% de CO₂ e 2% de O₂, resultando em algumas falhas de fusão, com vazios e inclusões aparentes entre os passes. A peça fabricada com 25% de CO₂ novamente apresentou o maior volume de sílica na superfície, mantendo a geometria e a coloração da sílica solidificada similares às observadas anteriormente.

O *pad* fabricado com 8% de CO₂, embora tenha mostrado maior oscilação e irregularidade geométrica em comparação com a condição de chapa limpa, apresentou visualmente boa aderência entre os cordões, sem defeitos visíveis causados pela sílica, cuja quantidade permaneceu praticamente a mesma.

Os resultados dos ensaios de raio-x dos *pads* soldados em chapa oxidada estão apresentados na Figura 49. Conforme analisado anteriormente, os resultados de raio-x não correspondem totalmente à realidade interna dos *pads*, já que a interseção entre os cordões aparece destacada como linhas mais escuras. Os defeitos revelados nessa etapa condizem com os observados na superfície, nos casos de soldagem com 8% de CO₂ e 2% de O₂. Apenas no *pad* com 25% de CO₂ foi detectada uma falta de fusão na metade do segundo cordão (da segunda camada), de cima para baixo, que não é visível na superfície, sugerindo que o defeito está localizado no interior do *pad*.

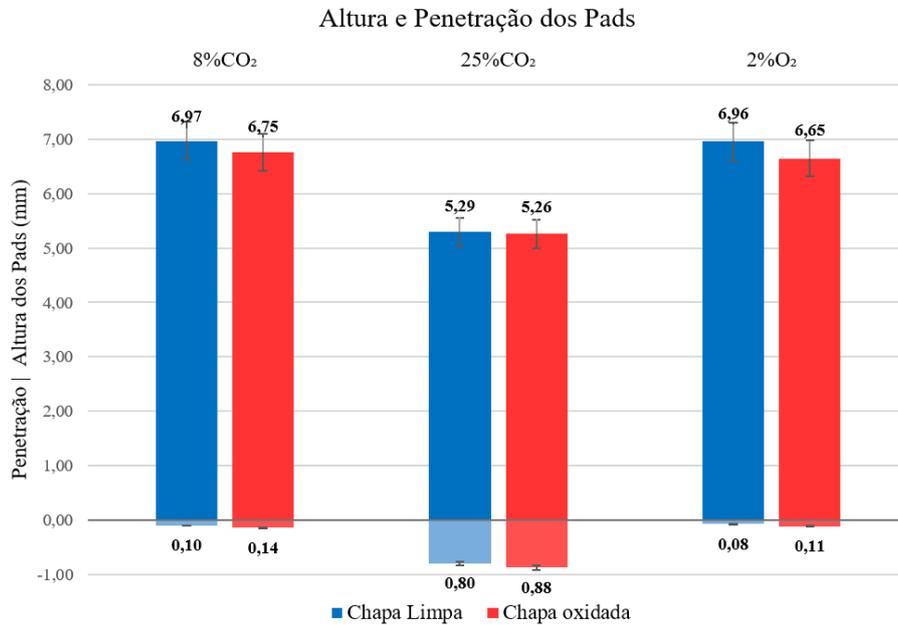
Figura 49 - Foto dos *pads* logo após a soldagem com o robô e resultados de raio-x em chapa oxidada, a) 8% CO₂; b) 25% CO₂ e; c) 2% O₂



Os resultados das macrografias dos *pads* soldados em chapas oxidadas, apresentados na Figura 50, são similares aos encontrados anteriormente em diferentes condições superficiais. Novamente, os *pads* soldados com 8% de CO₂ e 2% de O₂ apresentaram grandes inclusões de sílica entre os passes, em ambas as camadas, o que resultou em falta de fusão entre os cordões.

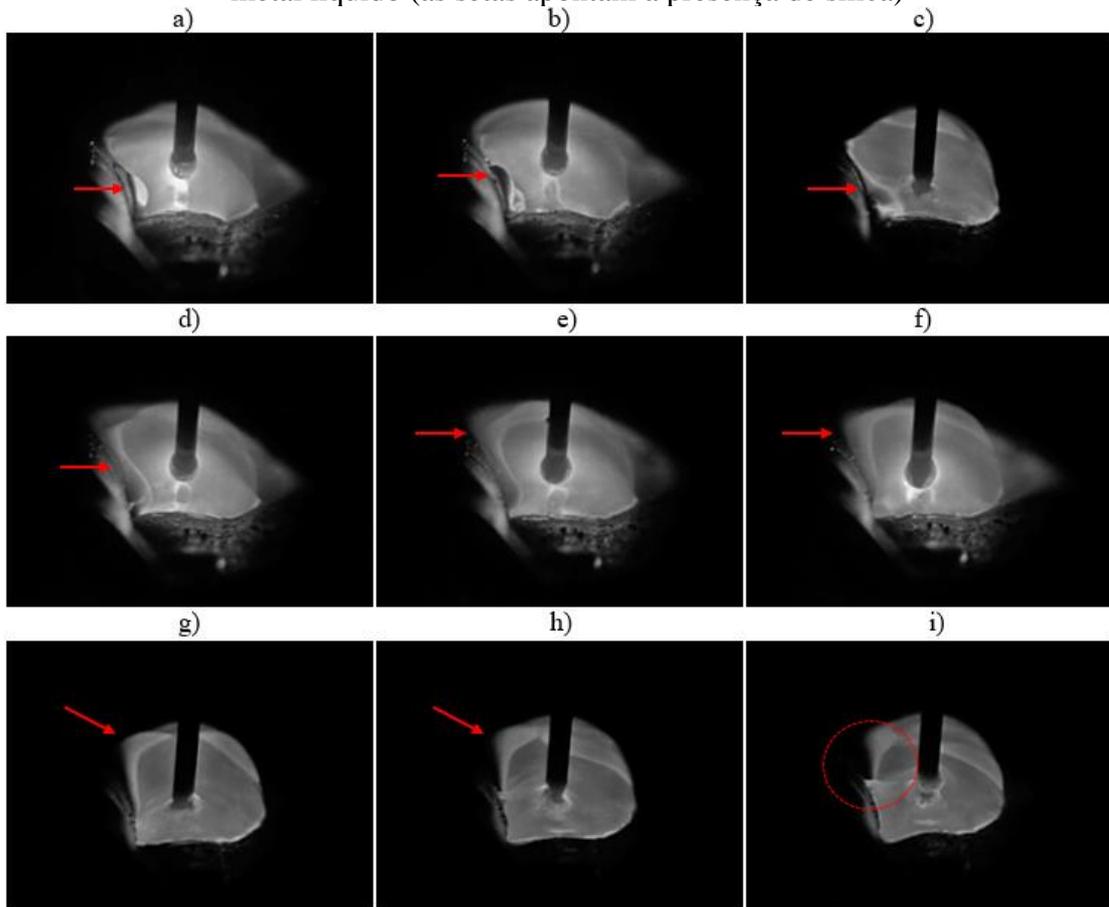
geometrias muito similares e penetração baixíssima, dando a aparência de que o *pad* está somente posicionado acima da chapa e aderido somente pelos cordões das extremidades.

Figura 51 - Gráfico dos *pads* soldados em chapa limpa e oxidada



Na inspeção visual dos corpos de prova soldados, destacou-se não somente uma diferença no volume de sílica formada como uma distinção na forma solidificada da mesma ao utilizar como gás ativo O₂ ou CO₂. As imagens retratadas na Figura 52 são frames retirados da filmagem com câmera de processo, de um ensaio utilizando gás com 2% O₂, onde é possível capturar o momento em que uma grande concentração de sílica em forma de ilha, identificada na imagem "a", que estava aderida na lateral do cordão anterior, provocou um defeito, impedindo a correta fusão entre os passes. Nas imagens "b" e "c" é possível visualizar a concentração de sílica sendo fundida e conduzida através do metal líquido, formando uma barreira e impedindo o mesmo de se unir ao outro cordão. Ao longo das imagens "d", "e", "f", "g" e "h" é possível observar a sílica fundida se deslocando por cima da poça metálica enquanto o metal se solidifica. Na imagem "i" o metal em solidificação fica destacado e é possível identificar o defeito que se formou, caracterizado como falta de material na região entre os cordões e sílica retida na cavidade.

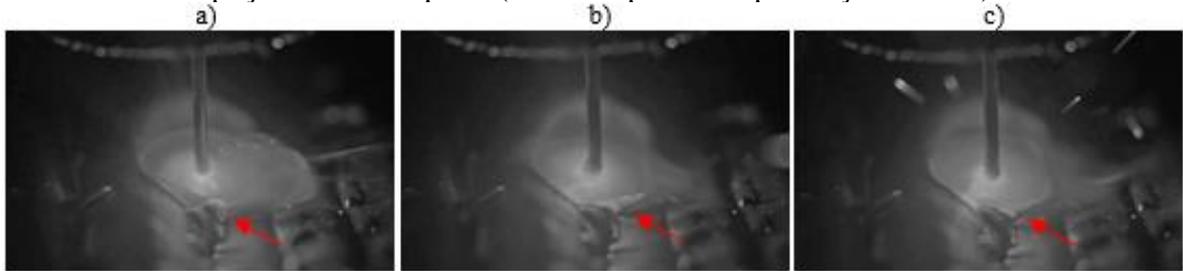
Figura 52 - Frames da filmagem com gás O₂ evidenciando a ação da sílica no arco e poça de metal líquido (as setas apontam a presença de sílica)



Na soldagem com 25% de CO₂, a quantidade de sílica, embora superior, apresenta uma melhor distribuição, como evidenciado na imagem "a" da Figura 53. A sílica, nessa condição, é conduzida pelo metal líquido de maneira diferente em comparação com o caso anterior. Conforme observado nas imagens "b" e "c", a sílica fundida é direcionada para as laterais da poça de fusão, em vez de se acumular na superfície. Isso resulta em concentrações de sílica solidificada, formando estruturas finas e longas que acompanham as bordas dos cordões de solda de maneira contínua.

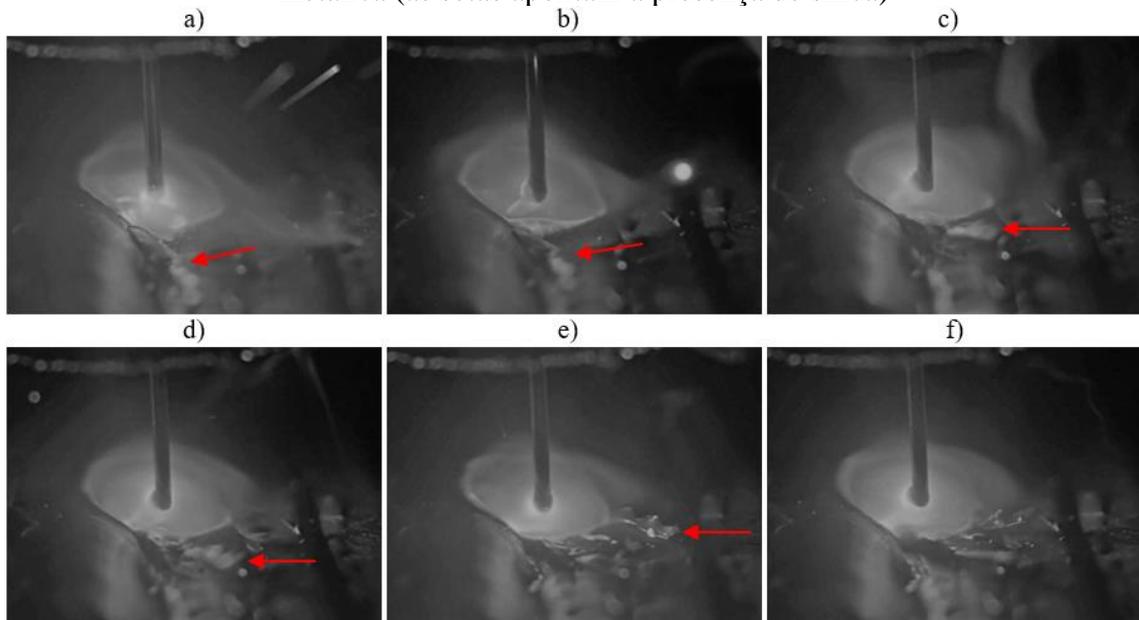
Uma hipótese para explicar essa diferença, evidenciada nas filmagens e análises visuais, é o maior potencial de oxidação dos gases contendo CO₂, o que resulta em uma maior energia. Outra possibilidade é a ocorrência de uma reação química diferente ao utilizar esse gás, que altera a fluidez da sílica líquida, contribuindo para a variação observada na sua distribuição.

Figura 53 - Frames da filmagem com gás 25%CO₂ evidenciando movimentação da sílica na poça de metal líquido (as setas apontam a presença de sílica)



Ao analisar as filmagens do processo de soldagem com 25%CO₂, foi possível registrar situações em que a sílica líquida foi expulsa da poça, como registrado na Figura 54. Quando a extremidade da concentração mais próxima do arco, identificada na imagem "a", entrou em contato com a poça metálica na imagem "b", a ação de fusão e incorporação da sílica na poça metálica provocou um efeito gangorra, que separou e elevou a outra extremidade do fragmento de sílica sólida, evidenciada na imagem "c". Com a aproximação do arco, essa sílica suspensa no ar foi fundida e expelida para fora, como observado nas imagens "e" e "f", demonstrando elevada fluidez e energia nessa condição.

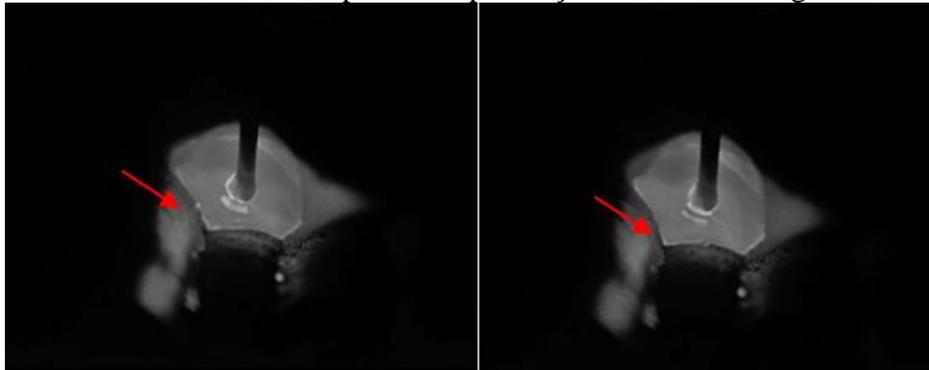
Figura 54 - Frames da filmagem com gás 25%CO₂ mostrando a sílica sendo expulsa da poça metálica (as setas apontam a presença de sílica)



As imagens da Figura 55 mostram dois frames subsequentes, extraídos de filmagens do processo de soldagem, que têm como objetivo identificar as concentrações de sílica retidas no "pé" dos cordões, entre os passes. No primeiro frame, a sílica identificada pela flecha

vermelha não teve tempo ou energia suficiente para ser completamente fundida e removida. No segundo frame, é possível observar que ela foi coberta por metal líquido, permanecendo retida no local.

Figura 55 - Frames da filmagem com gás O₂ evidenciando a sílica que fica retida no "pé" do cordão. As setas apontam a presença de sílica na imagem



4.4.2.3 Resultados de MEV e EDS

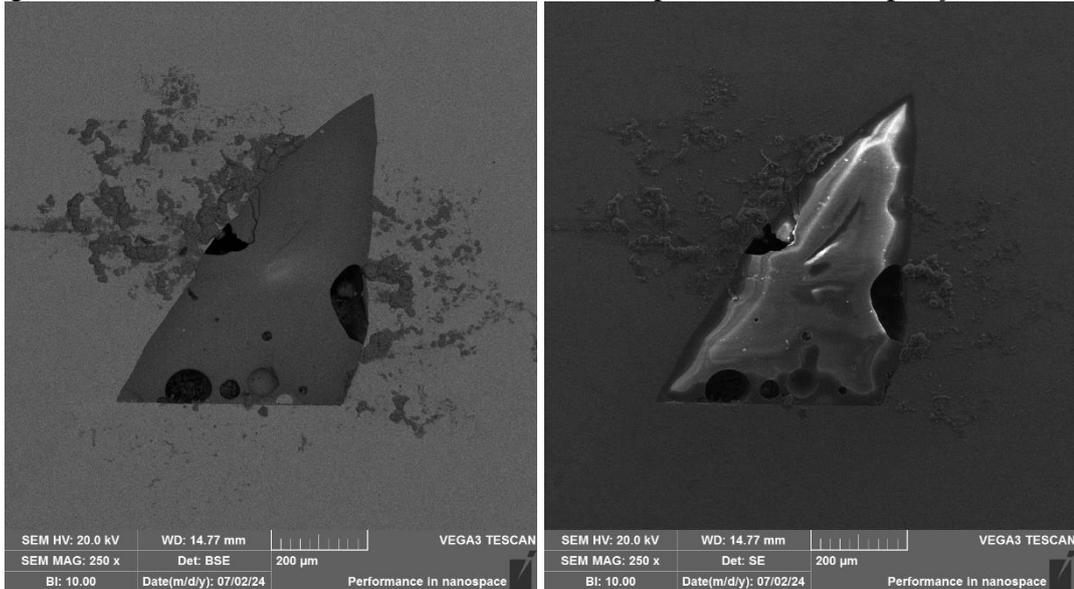
Buscando uma análise completa das inclusões encontradas entre os passes, as seções transversais dos *pads* foram examinadas com o Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado a técnica de Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS). O entendimento de que as inclusões presentes são compostos químicos formados por silício e oxigênio vêm de outras observações e trabalhos de soldagem com aço carbono. Normalmente, a sílica formada não tem relevância, visto que a mesma será removida na etapa de limpeza entre passes, o que não acontece nesse trabalho devido à aplicação remota.

A primeira análise foi realizada em uma seção transversal com somente uma camada, apresentada na Figura 56. Verifica-se nessa imagem que entre os cordões encontram-se grandes inclusões triangulares, e que o espaço é completamente preenchido por um material esverdeado. O detalhamento de uma dessas regiões no MEV, apresentado na Figura 57, mostra que o material é dissimilar ao metal ao seu redor e uma análise de composição química com o EDS apresentou a composição de 80,5% Oxigênio e 18,3% de silício, confirmando que as inclusões visíveis são óxido de silício (sílica). Outro elemento encontrado em algumas medições foi o Manganês (Mn), numa concentração de 65,0% de oxigênio, 21,9% Silício e 10,7% Manganês, o que aponta para a formação de óxido de manganês.

Figura 56 - Macrografia a seção transversal da primeira camada soldada com 8% de CO₂, destacando as inclusões de sílica



Figura 57 - Detalhamento de uma inclusão de sílica por MEV com ampliação de 250 x



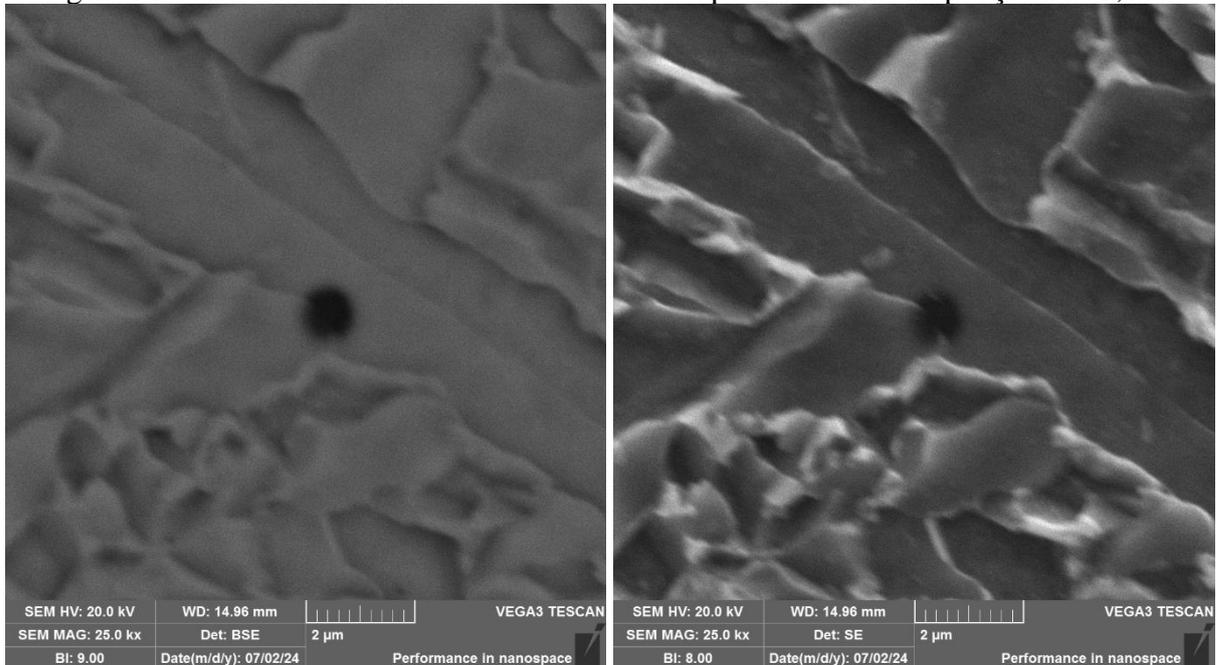
As pequenas formações ao redor da grande inclusão também foram analisadas e apontaram para uma composição de oxigênio e ferro, provavelmente ferrugem ou óxido de ferro decorrente da preparação das amostras. O que também ocorreu quando a presença de alumínio foi encontrada, provindo do óxido de alumínio utilizado na preparação na etapa de polimento.

Essa mesma análise foi realizada para todas as combinações de ensaios (gases de soldagem e condição superficial), e os resultados encontrados foram similares, apontando concentração de oxigênio, silício e manganês nas grandes inclusões.

Inclusões microscópicas localizadas no interior dos cordões também foram analisadas. Um exemplo dessas inclusões, apresentado na Figura 58, é uma formação circular com diâmetro de 1,3 µm. Para verificar se o óxido de silício também se distribui ao longo da microestrutura na forma de inclusões, foi realizada a medição da composição química desse ponto. Como o feixe de elétrons utilizado para essa medição tem 0,2 µm de diâmetro, é possível que o resultado inclua tanto o óxido identificado quanto a sua região adjacente. A análise química foi coerente com a presença de 55,3% de Ferro, 17,5% de Oxigênio, 11,8% de Manganês e 10,8% de Silício. Esses resultados sugerem que, além das grandes inclusões de sílica visíveis na superfície dos

cordões, parte do óxido de silício e do óxido de manganês formado durante o processo de soldagem também se incorpora como pequenas inclusões dentro da microestrutura, distribuídas ao longo do metal de solda.

Figura 58 - Detalhamento de uma inclusão de sílica por MEV com ampliação de 25,0 kx



Uma região específica de uma das amostras, soldada com gás contendo 2% de O₂ em chapa limpa, chamou a atenção por apresentar uma microestrutura mais escura logo abaixo de uma concentração de sílica, conforme mostrado na Figura 59. Essa observação sugere que a presença da sílica pode ter atuado como uma barreira térmica, isolando a região e impedindo o refinamento do grão, que seria esperado com o aquecimento gerado pelo cordão adjacente à direita. No entanto, uma análise macrográfica da amostra revelou que não houve mudanças significativas na aparência ou geometria da zona termicamente afetada (ZTA).

Na tentativa de identificar fenômenos semelhantes em outras amostras, a Figura 60 apresenta a macrografia da seção transversal do *pad* soldado com 8% de CO₂ sobre chapa oxidada. Nessa imagem, observa-se um gap entre as zonas termicamente afetadas, localizado logo abaixo de uma grande concentração de sílica, sugerindo que a presença desse óxido pode ter sido a responsável por esse defeito. Como não foi possível observar esse fenômeno em outras amostras, não foi possível estabelecer uma correlação clara entre o tamanho das inclusões e a condição superficial da chapa.

Figura 59 - Detalhamento de uma inclusão de sílica a) no MEV e; b) câmera fotográfica

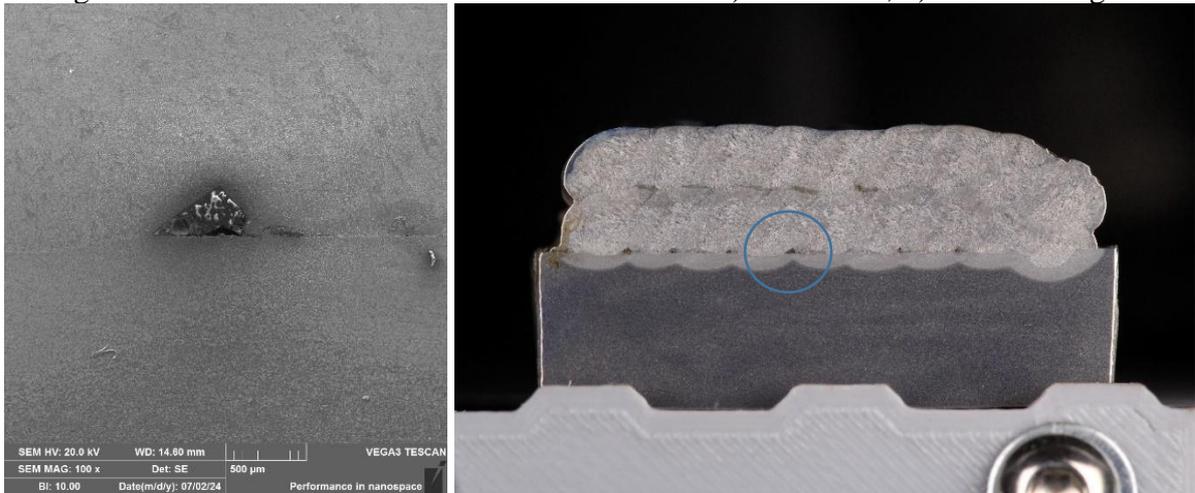
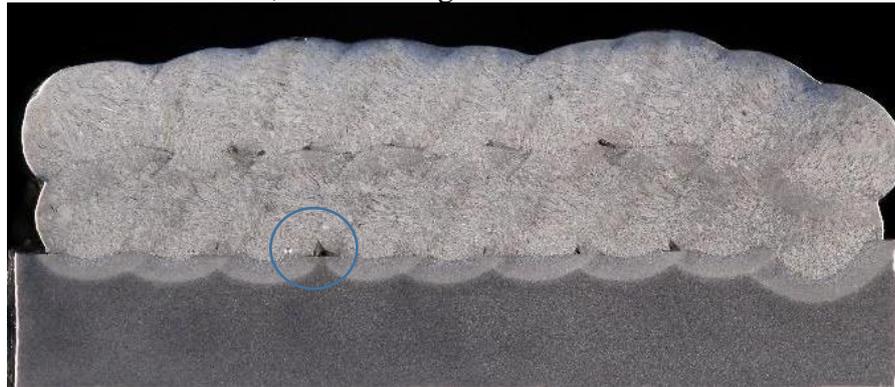


Figura 60 - Macrografia da seção transversal do *pad* soldado com 8% de CO₂ sobre chapa oxidada, destacando grande inclusão de sílica



4.4.2.4 Análise de composição química da superfície dos *pads*

Como o silício utilizado para formar a sílica é provido pelo metal do arame e da chapa, por meio da análise química da superfície dos *pads*, buscou-se constatar se os *pads* sofreram empobrecimento de silício devido à sua associação com oxigênio ao longo do processo de soldagem. A composição química medida está apresentada nas Tabelas 14 e 15 abaixo.

Tabela 13 - Composição química medida na superfície dos *pads* soldados em chapa limpa

Mistura Gasosa	C	Si	Mn	P	S	Cr
8% CO ₂	0,03	0,90	1,49	0,01	0,02	0,04
25% CO ₂	0,03	0,78	1,22	0,01	0,02	0,04
2% O ₂	0,03	0,90	1,38	0,01	0,02	0,03

Tabela 14 - Composição química medida na superfície dos *pads* soldados em chapa oxidada

Mistura Gasosa	C	Si	Mn	P	S	Cr
8% CO ₂	0,04	0,96	1,44	0,01	0,01	0,03
25% CO ₂	0,04	0,89	1,27	0,01	0,05	0,03
2% O ₂	0,04	1,09	1,38	0,01	0,02	0,03

A amostra fabricada com a mistura de 25% de CO₂ em relação às demais, apresentou menor concentração de silício e manganês, o que pode indicar que para a amostra com 25% de CO₂ realmente houve uma maior formação de óxido, resultando no empobrecimento de elementos na composição química do metal do cordão. Esse resultado corrobora a literatura, que cita a inclusão de elementos desoxidantes na composição dos arames de soldagem justamente para reagir com os componentes ativos do gás de proteção. Ao depositar os cordões sobre chapa com superfície oxidada o resultado se apresentou similar; menor concentração de silício e manganês na peça soldada com 25% de CO₂. Nesses ensaios, o teor desses elementos entre as peças soldadas com 8% CO₂ e 2% O₂ variou mais do que no anterior, apontando uma menor formação de sílica para soldagem com O₂ sobre chapa com oxidação.

5 CONCLUSÃO

O trabalho investigou o processo de soldagem MIG/MAG voltado para reparos remotos de estruturas metálicas degradadas, focando em variantes do processo, classificações de superfícies, dinâmicas de fonte, diâmetros de arame e gases de proteção. As principais conclusões são apresentadas a seguir:

O processo MIG/MAG convencional se mostrou mais robusto e confiável do que a variante de curto-circuito controlado utilizada, especialmente em aplicações que envolvem a soldagem de superfícies irregulares. A sua maior estabilidade e facilidade de parametrização proporcionaram uma execução mais consistente, com menos interrupções e defeitos geométricos do cordão. A instabilidade observada no processo curto-circuito controlado foi de fácil resolução com o aumento da intensidade de corrente, mas a sua complexidade de parametrização a descartou como uma boa aplicação para esse trabalho, indicando que essa variante ainda carece de um melhor desenvolvimento de melhores programas sinérgicos.

As diferentes metodologias de cálculo da taxa de corrente apresentaram variações nos resultados, sendo o menor valor obtido pelo método SAP com limiar de corrente personalizado. Essa metodologia demonstrou maior precisão no cálculo das variações de corrente no processo convencional, com transferência por curto-circuito, onde as oscilações de corrente exercem impacto significativo na qualidade da solda. A fase de descida, por sua natureza mais instável, foi crítica na escolha da metodologia, devido à influência da proximidade do arame à poça de fusão e à dinâmica de formação da gota. A análise por meio da derivada instantânea, apresentada em forma de gráfico, evidenciou que o comportamento da taxa de variação da corrente não é linear, como inicialmente esperado, indicando que a utilização de um único valor pode não representar adequadamente o comportamento real.

Os testes de alimentação com arames de diâmetros 1,0 mm e 0,8 mm revelaram comportamentos distintos em termos de estabilidade de alimentação e qualidade do cordão de solda. Durante a soldagem em altas velocidades de alimentação e taxas de deposição, o arame de 0,8 mm apresentou instabilidades que não foram observadas com o de 1,0 mm. Por outro lado, ao utilizar velocidades intermediárias, ambos os arames mantiveram estabilidade na alimentação, proporcionando um processo de soldagem consistente. O arame de 0,8 mm demonstrou ser uma opção mais atrativa por possibilitar o uso de fontes de soldagem de menor potência, característica que o torna especialmente adequado para condições de trabalho em campo.

A degradação superficial das peças, devido à oxidação, teve um impacto significativo na qualidade do processo de soldagem. Superfícies com uma camada de oxidação mais espessa dificultaram a abertura e a manutenção do arco, chegando a impossibilitar a soldagem. Em contraste, superfícies com uma camada de oxidação mais fina permitiram a soldagem, sem diferenças significativas no processo, o que resultou em melhor regularidade geométrica e maior aderência do cordão.

A utilização de arame de aço com diâmetro de 0,8 mm e diferentes gases de proteção (8% CO₂, 25% CO₂ e 2% O₂) influenciou diretamente a formação de sílica, a porosidade e os respingos, impactando a qualidade do cordão de solda. A mistura com 25% de CO₂ resultou em maior formação de sílica e respingos, além de gerar cordões de solda mais largos. Em contrapartida, as misturas com 8% de CO₂ e 2% de O₂ proporcionaram soldas com maior regularidade geométrica e menos defeitos visíveis na superfície. Entretanto, ao soldar chapas espessas com arame de 0,8 mm utilizando transferência por curto-circuito, observou-se uma tendência à falta de penetração ao usar essas misturas. Para alcançar uma penetração adequada, foi necessário utilizar a mistura com 25% de CO₂. Além disso, a análise das seções transversais dos *pads* depositados revelou que a mistura com 25% de CO₂ promoveu uma melhor eliminação dos óxidos da poça metálica, devido ao seu maior potencial de oxidação. A maior energia do arco favoreceu a remoção da sílica, vaporizando-a rapidamente ou permitindo sua flutuação até a superfície. A geometria do cordão depositado com esse gás também facilitou a expulsão de impurezas, resultando na única peça sem inclusões e com boa aderência nas interseções dos cordões. Nos ensaios de soldagem realizados em chapas oxidadas, os resultados foram similares, sendo que a condição que apresentou menor ocorrência de defeitos internos foi a soldagem com 25% de CO₂. Contudo, os óxidos presentes na superfície das chapas contribuíram para a formação de inclusões, e todos os *pads* apresentaram sílica.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir serão sugeridos alguns tópicos que podem ser abordados em trabalhos futuros, sendo estes:

- Soldagem fora de posição, utilizar os resultados encontrados nesse trabalho para expandir a aplicação para além de soldagem na posição plana;
- Realizar deposição de cordões em superfícies com outros tipos de impureza ou degradação superficial como óleo ou resíduo de tinta;

- Realizar deposição de cordões em superfícies que imitam o ambiente marítimo da aplicação;
- Soldar em chapas que unem oxidação e irregularidades superficiais, buscando entender como o processo irá se comportar.

REFERÊNCIAS

AWS - American Welding Society. (2004). "Welding Handbook - Welding Science and Technology," (9ª ed., Vol. 2).

BAIXO, Carlos Eduardo Iconomos. Estudo da soldagem mig/ mag pela técnica hiperbárica a seco visando sua aplicação em procedimentos de reparo submarino. 191 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

BONACORSO, Nelso Gauze. Automatização dos Processos de Medição de Superfícies e de Deposição por Soldagem Visando a Recuperação de Rotores de Turbinas Hidráulicas de Grande Porte. 114 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

BONNIN-PASCUAL, Francisco; ORTIZ, Alberto. On the use of robots and vision technologies for the inspection of vessels: a survey on recent advances. Ocean Engineering, [S.L.], v. 190, p. 106420, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106420>.

BOUGHTON, P. Control of short circuiting in MIG welding. Welding Research International 4(2): 31–53. 1974.

BROŽEK, Milan. The Influence Surface Treatment on the Firmness of Spot Welds. Manufacturing Technology, Czech University Of Life Sciences Prague, Faculty Of Engineering, Department Of Material Science And Manufacturing Technology, 165 21 Prague 6 Suchdol, v. 18, n. 4, p. 1-7, set. 2018.

CARY, H.B. Modern Welding Technology. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, USA, 1979, p. 154.)

CORRÊA, Douglas. Campos do pré-sal batem recorde de produção em fevereiro. AgênciaBrasil, 2023. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2023-04/campos-do-presalbatem-recorde-de-producao-em-fevereiro>. Acesso em: 06, abril e 2023.

COSTA, Maria Celeste Monteiro de Souza; STARLING, Cícero Murta Diniz; MODENESI, Paulo José. Characterization of GMAW arc instability phenomena related to low oxidation potential shielding gases. *Welding International*, [S.L.], v. 24, n. 3, p. 214-221, mar. 2010. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/09507110902843859>.

DAI, T. et al. The Toughness of High-Strength Steel Weld Metals: alta tenacidade de solda pode ser alcançada usando um gás de proteção inerte durante a soldagem para reduzir as inclusões de óxido no metal de solda. *Welding Research*, [s.l.], p. 67-88, fev. 2022.

DAS, Subhash; VORA, Jaykumar; PATEL, Vivek; BOGUM, Surender. Experience with advanced welding techniques (RMD & P-GMAW) with seamless metal cored wire for Oil & Gas pipeline industries. *Journal Of Physics: Conference Series*, [S.L.], v. 1950, n. 1, p. 012043, 1 ago. 2021. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1950/1/012043>.

DIRENE, H. MIG/MAG CCC - Avanços na Tecnologia de Controle da Transferência Metálica como Solução para o Passe de Raiz. UFSC. Dissertação de Mestrado. Florianópolis, p. 108. 2014.

DUTRA, J. C.. MIG/MAG - Transferência Metálica por Curto-Circuito – Fontes de Soldagem versus Gases do Arco. *Soldagem & Inspeção*, v. 13, No. 1, p. 19-24, 2008.

DUTRA, J. C. ; SANTOS, Túlio Fernandes dos ; OLIVEIRA, Moisés Alves de . Estudo da Taxa de Fusão de Arames de Aço Carbono no Processo MIG/MAG. In: XXVII CONSOLDA Congresso Nacional de Soldagem, 2002, São Paulo. Anais XXVIII CONSOLDA. São Paulo : Associação Brasileira de Soldagem, 2002.)

DUTRA, J. C.; SILVA, R. G. E. MIG-MAG - Transferência Metálica por Curto-Circuito sob Controle da Forma de Onda da Corrente - Sistemas CCC e STT - Fundamentos. *Soldagem e Inspeção*, v. 13, n. 2, p. 92-96, 2008.

DUTRA, Jair Carlos; SILVA, Régis Henrique Gonçalves e; MARQUES, Cleber. Características de fusão e potência de soldagem com a transferência MIG - CMT versus MIG convencional para Alumínio 5183. *Soldag. insp.*, São Paulo, v. 18, n. 1, mar. 2013.

DUTRA, Jair Carlos. Ciência e tecnologia da soldagem a arco voltaico: fundamentos às modernas técnicas. Palhoça: Do Autor, 2023.

EBRAHIMNIA, Mohamad; GOODARZI, Massoud; NOURI, Meisam; SHEIKHI, Mohsen. Study of the effect of shielding gas composition on the mechanical weld properties of steel ST 37-2 in gas metal arc welding. *Materials & Design*, [S.L.], v. 30, n. 9, p. 3891-3895, out. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.03.031>.

ELSHAWESH, F. et al. Corrosion Fatigue of Incoloy 825 Flare Gas Line Bellows of Expansion Joints. *Journal Of Failure Analysis And Prevention*, [S.L.], v. 15, n. 1, p. 7-14, 14 nov. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11668-014-9900-9>.

GADALLAH, Ramy et al. Influence of Shielding Gas Composition on the Properties of Flux-Cored Arc Welds of Plain Carbon Steel. *International Journal Of Engineering And Technology Innovation*, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 01-12, 2012.

GALEAZZI, Daniel. Soldagem MIG/MAG Orbital com Sensoriamento Laser: Análise e Melhorias de Condições Operacionais para Aumento da Confiabilidade. 2019. 189p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

GALEAZZI, Daniel; SILVA, Régis Henrique Gonçalves e; PIGOZZO, Ivan Olszanski; ROSA, Alisson Fernandes da; PEREIRA, Alex Sandro; MARQUES, Cleber. Analysis of current pulse during short-circuit phase in CMT version of GMAW process under a view of additive manufacturing. *Welding In The World*, [S.L.], v. 66, n. 7, p. 1369-1380, 5 abr. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40194-022-01298-1>.

GALEAZZI, Daniel; SILVA, Régis Henrique Gonçalves e; VIVIANI, Alberto Bonamigo; JAEGER, Pedro Rocha; SCHWEDERSKY, Mateus Barancelli. Evaluation of thermal and geometric properties of martensitic stainless steel thin walls built by additive manufacturing cold metal transfer (CMT) processes. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, [S.L.], v. 120, n. 3-4, p. 2151-2165, 19 fev. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-022-08921-x>.

GOHR JR, R. Novos Métodos de Controle da Soldagem MIG/MAG. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, v. Tese de Doutorado, 2002. 138 p.

HERTEL, M.; TRAUTMANN, M.; JÄCKEL, S.; FÜSSEL, U.. The Role of Metal Vapour in Gas Metal Arc Welding and Methods of Combined Experimental and Numerical Process Analysis. Plasma Chemistry And Plasma Processing, [S.L.], v. 37, n. 3, p. 531-547, 30 jan. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11090-017-9790-1>

JONSSON, P.G.; MURPHY, A.B.; SZEKELY, J.. The Influence of Oxygen Additions on Argon-Shielded Gas Metal Arc Welding Processes: o fluxo de massa, o potencial elétrico e a temperatura na coluna do arco mostraram-se pouco afetados por adições de 5% ou menos de oxigênio. Welding Journal, [s.l.], p. 48-58, fev. 1995.

KAH, P.; MARTIKAINEN, J.. Influence of shielding gases in the welding of metals. The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, [S.L.], v. 64, n. 9-12, p. 1411-1421, 12 abr. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4111-6>.

KAH, P.; SUORANTA, R.; MARTIKAINEN, J.. Advanced gas metal arc welding processes. The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, [S.L.], v. 67, n. 1-4, p. 655-674, 30 set. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4513-5>.

KAH, Paul; EDIGBE, Gabriel Ogheneluona; NDIWE, Benoit; KUBICEK, Rastislav. Assessment of arc stability features for selected gas metal arc welding conditions. Sn Applied Sciences, [S.L.], v. 4, n. 10, 11 set. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s42452-022-05150-5>.

KAH, Paul; LATIFI, Hamidreza; SUORANTA, Raimo; MARTIKAINEN, Jukka; PIRINEN, Markku. Usability of arc types in industrial welding. International Journal Of Mechanical And Materials Engineering, Lappeenranta, v. 9, n. 15, p. 1-12, 2014. <Http://www.springer.com/40712/content/9/1/15>.

KAH, Paul; LAYUS, Pavel; NDIWE, Benoit. Submerged arc welding process peculiarities in application for Arctic structures. *Aims Materials Science*, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 498-511, 2022. American Institute of Mathematical Sciences (AIMS). <http://dx.doi.org/10.3934/matersci.2022029>.

KAIROS subsea. Disponível em: https://rioanalytics.com.br/en/homepage/homepage_/. Acesso em: 20 out. 2022

KIM, Y.s.; EAGAR, Tw. Analysis of metal transfer in gas metal arc welding. *Welding Journal*, [s. l], v. 72, p. 269-278, 1993.

KINDERMANN, R. Soldagem Orbital Do Passe De Raiz – Algoritmos Para Controle Adaptativo Por Meio De Sensoriamento Laser. UFSC. Dissertação de Mestrado. Florianópolis, p. 174. 2016.

KOU, Sindo. *Welding metallurgy*. New Jersey, USA, v. 431, n. 446, p. 223-225, 2003.

LARA, Mauricio; DÍAZ, Víctor Vergara; CAMUS, Manuel; CUNHA, Tiago Vieira da. Effect of transverse arc oscillation on morphology, dilution and microstructural aspects of weld beads produced with short-circuiting transfer in GMAW. *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, [S.L.], v. 42, n. 9, 5 ago. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40430-020-02533-w>.

LISKEVYCH, Olga; SCOTTI, Américo. Influence of the CO₂ content on operational performance of short-circuit GMAW. *Welding In The World*, [S.L.], v. 59, n. 2, p. 217-224, 18 out. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40194-014-0196-x>.

LUCAS, Willian; IORDACHESCU, Dativ; PONOMAREV, V. Classification of metal transfer modes in GMAW, *IIW Doc*. 2005.

MAINIER, Fernando B.; REIS, Marcone F.; NUNES, Fabiano R. C.; ZEEMANN, Annelise. Impact of Deterioration of Flare of an Offshore Oil Platform. *Journal Of Materials Science And*

Engineering B, [S.L.], v. 6, n. 1, p. 30-39, 28 fev. 2016. David Publishing Company. <http://dx.doi.org/10.17265/2161-6221/2016.1-2.003>.

MANCO, Miguel R.; VAZ, Murilo A.; CYRINO, Julio C.R.; LIANG, Denis A.. Mechanical behavior assessment of FPSO mid-ship repaired stiffened corroded side panels under combined loading. Engineering Structures, [S.L.], v. 251, p.113441, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113441>.

MCINTOSH, C.; CHAPUIS, J.; MENDEZ, P.. Effect of ArCO₂ Gas Blends on Droplet Temperature in GMAW: a temperatura da gota pode ser reduzida enquanto se mantém uma taxa de deposição similar. Welding Research, [s.l.], v. 95, p. 273-279, ago. 2016.)

MITRA, U.; EAGAR, T. W.. Slag-metal reactions during welding: part iii. verification of the theory. Metallurgical Transactions B, [S.L.], v. 22, n. 1, p. 83-100, fev. 1991. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02672530>.

MODENESI, Paulo J.. Fontes de Energia para a Soldagem a Arco. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. 37.

MODENESI, B. A. Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

MVOLA, Belinga; KAH, Paul. Effects of shielding gas control: welded joint properties in gmaw process optimization. The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, [S.L.], v. 88, n. 9-12, p. 2369-2387, 1 jun. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-8936-2>.

MVOLA, Belinga; KAH, Paul; LAYUS, Pavel. Review of current waveform control effects on weld geometry in gas metal arc welding process. The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, [S.L.], v. 96, n. 912, p. 4243-4265, 22 mar. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-018-1879-z>.

NORRISH, John. A Review of Metal Transfer Classification in Arc Welding, 2003. International Institute of Welding. Doc. XII-1769-03.

NORRISH, John. Evolution of Advanced Process Control in GMAW: innovations, implications, and application. *Welding Journal*, [S.L.], v. 103, n. 06, p. 161-175, 1 mar. 2024. American Welding Society. <http://dx.doi.org/10.29391/2024.103.015>.

NORRISH, John; CUIURI, Dominic. The controlled short circuit GMAW process: a tutorial. *Journal Of Manufacturing Processes*, [S.L.], v. 16, n. 1, p. 86-92, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.08.006>.

RHEE, Sehun; KANNATEY-ASIBU, Elijah. Analysis of arc pressure effect on metal transfer in gas-metal arc welding. *Journal Of Applied Physics*, [S.L.], v. 70, n. 9, p. 5068-5075, 1 nov. 1991. AIP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/1.349014>.

ROCHA, P.; SCHWEDERSKY, M.; MACIEL, P.; GALEAZZI, D.; SILVA, R. Welding beads overlapping algorithm dedicated to waam. In: *Proceedings of the 26th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2021)*. [S.l.: s.n.], 2021.

SARTORI, Francisco. TECNOLOGIAS E TÉCNICAS MODERNAS DO PROCESSO MIG/MAG PARA O PASSE DE RAIZ EM SOLDAGEM ORBITAL DE TUBOS. 2016. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. Soldagem MIG/MAG melhor entendimento melhor desempenho. São Paulo: Artliber, 2014.

SCOTTI, Américo; PONOMAREV, Vladimir. Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho. São Paulo: Artliber Editora, 2008.

SCOTTI, Américo; PONOMAREV, Vladimir; LUCAS, William. A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding. *Journal Of Materials Processing Technology*, [S.L.], v. 212, n. 6, p. 1406-1413, jun. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.01.021>.

SILVA, R. H. G. Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por CurtoCircuito Aplicada ao Passe de Raiz. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, v. Dissertação de Mestrado, 2006. 127 p.

SILVA, R. H. G.; SCHWEDERSKY, M. B.; MARQUES, C.; SCHAEFFER, C. M.; GALEAZZI, D.; ZANELLA, G. C.; Proceedings of the Thirty-fourth (2024) International Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece, June 16–21, 2024

SILVA, Régis Henrique Gonçalves e; DUTRA, J. C. . Fundamentos Científicos e Tecnológicos para o Desenvolvimento do Processo MIG/MAG por Curto-Circuito Controlado (CCC) Uma Revisão da Literatura. Parte 2 de 3: Formação da Gota Metálica, Gases de Proteção, Mecanismos de Penetração, Aporte Térmico e Aspectos Econômicos. Soldagem & Inspeção, v. 12, p. 326335, 2007.

SILWAL, Bishal et al. An experimental investigation of the effectiveness of Ar-CO₂ shielding gas mixture for the wire arc additive process. The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, [S.L.], v. 108, n. 5-6, p. 1285-1296, maio 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-020-05395-7>.

SISODIA, Raghawendra Pratap Singh; GÁSPÁR, Marcell. An Approach to Assessing S960QL Steel Welded Joints Using EBW and GMAW. Metals, [S.L.], v. 12, n. 4, p. 678, 15 abr. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/met12040678>.

SOARES, Luciane; BOTELHO, Silvia; NAGEL, Ricardo; DREWS, Paulo Lilles. A Visual Inspection Proposal to Identify Corrosion Levels in Marine Vessels Using a Deep Neural Network. 2021 Latin American Robotics Symposium (Lars), 2021 Brazilian Symposium On Robotics (Sbr), And 2021 Workshop On Robotics In Education (Wre), [S.L.], p. 1-8, 11 out. 2021. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/lars/sbr/wre54079.2021.9605400>.

SODERSTROM, E. J.; MENDEZ, Patricio F.. Metal Transfer during GMAW with Thin Electrodes and Ar-CO₂ Shielding Gas Mixtures: droplet diameters do not decrease proportionally with electrode diameters as small as 0.016 in. and repelled transfer mode is dominant above 30% co₂. Welding Journal, New York, v. 87, n. 5, p. 124-132, maio 2008

SUBAN, Marjan; TUŁEK, Janez. Methods for the determination of arc stability. *Journal Of Materials Processing Technology*, [S.L.], v. 143-144, p. 430-437, dez. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136\(03\)00416-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136(03)00416-3).

TESKE, Mario; MARTINS, Fábio. The influence of the shielding gas composition on GMA welding of ASTM A 516 steel. *Welding International*, [S.L.], v. 24, n. 3, p. 222-230, mar. 2010. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/09507110902843875>.

THEWLIS, C.; MILNER, D. R.. Inclusion Formation in Arc Welding: o movimento induzido eletromagneticamente na poça de solda é o principal fator que determina a quantidade e a distribuição de inclusões em soldas a arco feitas em cobre. *Welding Journal*, [s.l.], p. 281-288, set. 1977.

YOUSEFI, Mehrdad; FARGHADIN, Mohammad Hossein; FARZADI, Ali. Investigate the causes of cracks in welded 310 stainless steel used in the Flare tip. *Engineering Failure Analysis*, [S.L.], v. 53, p. 138-147, jul. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.04.002>.

ZIELINSKA, S.; PELLERIN, S.; VALENSI, F.; DZIERZEGA, K.; MUSIOL, K.; IZARRA, Ch. de; BRIAND, F.. Gas influence on the arc shape in MIG-MAG welding. *The European Physical Journal Applied Physics*, [S.L.], v. 43, n. 1, p. 111-122, 24 jun. 2008. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/epjap:2008106>