CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

LEONARDO CALDEIRA DE ÁVILA COUTO

EFEITO DO ÂNGULO DE ATAQUE SOBRE A TRANSFERÊNCIA METÁLICA E PERFIL DE SOLDAS PRODUZIDAS EMPREGANDO ARAME TUBULAR AWS A5.36 E71T1-C1A2-CS2

Belo Horizonte
2026

Leonardo Caldeira De Ávila Couto

EFEITO DO ÂNGULO DE ATAQUE SOBRE A TRANSFERÊNCIA METÁLICA E PERFIL DE SOLDAS PRODUZIDAS EMPREGANDO ARAME TUBULAR AWS A5.36 E71T1-C1A2-CS2

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Turani Vaz

Coorientador: Eng. Rafael Elias Gomes Leal

Belo Horizonte

2026

Couto, Leonardo Caldeira de Ávila.
C871e Efeito do ângulo de ataque sobre a transferência metálica e perfil de soldas produzidas empregando arame tubular AWS A5.36 E71T1-C1A2-CS2 / Leonardo Caldeira de Ávila Couto. – 2026.
58 f. : il.
Orientador: Cláudio Turani Vaz.
Coorientador: Rafael Elias Gomes Leal.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2026.
Bibliografia.
1. Engenharia de materiais. 2. Soldagem. 3. Soldagem elétrica. 4. Ângulo de ataque (Aerodinâmica). 5. Juntas soldadas. I. Vaz, Cláudio Turani. II. Leal. Rafael Elias Gomes. III. Título.
CDD: 671.52

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca - *campus* Nova Suíça - CEFET-MG
Bibliotecária: Rosiane Maria Oliveira Gonçalves - CRB6-2660

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS - NS

FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC Nº 7 / 2026 - CEMAT (11.51.06)

Nº do Protocolo: 23062.033471/2026-12

Belo Horizonte-MG, 28 de junho de 2026.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Defesa Final do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) 2026/1

Aos **19 dias do mês de junho de 2026**, no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Nova Suíça, o aluno **Leonardo Caldeira de Avila Couto**, matrícula 201712070509 apresentou o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado *Efeito do Ângulo de Ataque sobre a Transferência Metálica e Perfil de Soldas Produzidas Empregando Arame Tubular AWS A5.36 E71T1-C1A2-CS2*, como parte do requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais, o qual foi **APROVADO** pela Banca Examinadora:

Prof. Dr. Cláudio Turani Vaz (Orientador)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Eng. Rafael Elias Gomes Leal (Coorientador)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Carlos Alberto Carvalho Castro
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Eduardo Pereira da Silva
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

(Assinado digitalmente em 29/06/2026 10:56)
CARLOS ALBERTO CARVALHO CASTRO
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DMCVG (11.64.05)
Matrícula: 2494298

(Assinado digitalmente em 29/06/2026 10:49)
CLAUDIO TURANI VAZ
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
POSMAT (11.52.07)
Matrícula: 1812853

(Assinado digitalmente em 29/06/2026 09:29)
EDUARDO PEREIRA DA SILVA
TECNICO DE LABORATORIO AREA
DMCVG (11.64.05)
Matrícula: 1681927

(Assinado digitalmente em 28/06/2026 22:32)
RAFAEL ELIAS GOMES LEAL
DISCENTE
Matrícula: 20255009541

Visualize o documento original em **https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp** informando seu número: **7**, ano: **2026**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão: **28/06/2026** e o código de verificação: **eddfbe16b4**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, fonte de força, fé, sabedoria e inspiração em todos os momentos dessa jornada. Sua presença constante me guiou e sustentou durante todo o processo de elaboração deste trabalho.

À minha família, especialmente aos meus pais, pelo amor incondicional, pelo apoio e incentivo em cada etapa da minha vida acadêmica. Suas palavras de encorajamento e compreensão foram fundamentais para que eu pudesse superar os desafios e alcançar mais essa conquista.

Agradeço imensamente aos meus orientadores, Professor Cláudio Vaz e mestrando Rafael Leal, pela orientação precisa, paciência e dedicação. Seus ensinamentos e conselhos foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. A constante disponibilidade para esclarecer dúvidas e orientar pesquisas foram de enorme valor.

À instituição CEFET, por fornecer um ambiente acadêmico estimulante e por proporcionar os recursos necessários para a realização deste trabalho. Agradeço aos professores e colegas que, direta ou indiretamente, contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional durante essa trajetória.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste TCC, meu sincero agradecimento.

RESUMO

A soldagem é uma técnica fundamental em diversas indústrias, desempenhando um papel crucial na fabricação e montagem de estruturas e equipamentos metálicos. Entre os muitos fatores que influenciam a qualidade e as propriedades da solda produzida, o ângulo de ataque da tocha é um parâmetro essencial a ser considerado. Dessa forma, compreender seus efeitos é essencial para otimizar os processos de soldagem, garantindo a produção de soldas de alta qualidade, com boa integridade estrutural e desempenho mecânico adequado. Esse trabalho teve como meta estudar o impacto de diferentes ângulos sobre o modo de transferência metálica, as características geométricas do cordão e os aspectos morfológicos da seção transversal de soldas obtidas empregando arame tubular E71T1-C1A2-CS2 e proteção gasosa de 100% CO_2 sobre chapa de aço ASTM A36. Para se atingir esse objetivo foi realizada a deposição mecanizada de cordões de solda monitorando os sinais elétricos. Após o tratamento dos dados coletados, foram obtidos valores de tensão e corrente média, aporte térmico, além de gerados os oscilogramas e histogramas. Os resultados evidenciaram que a variação do ângulo de ataque influenciou significativamente os sinais elétricos, a transferência metálica e a geometria dos cordões. O ângulo de 90° apresentou os maiores valores de corrente média (179,6A), potência aparente (4818VA) e aporte térmico (1,4kJ/mm), resultando também na maior penetração (1,5mm), maior área de diluição (14,6mm²) e maior diluição (35%). Em contrapartida, o ângulo de 150° apresentou os menores valores de corrente média (134,9A), potência aparente (3593VA) e aporte térmico (1,1J/mm), associados à menor penetração (0,9 mm), menor área de diluição (6,3mm²) e menor diluição (19%), além do maior reforço médio (3,3mm). Comparativamente, o aumento do ângulo de 90° para 150° promoveu reduções de aproximadamente 25% na corrente média, potência aparente e aporte térmico. Entretanto, as reduções observadas na penetração (40%) e na diluição (47%) foram mais expressivas, indicando que as alterações geométricas não decorreram exclusivamente da diminuição da energia transferida ao material, mas também de mudanças na direção do arco elétrico e na dinâmica da transferência metálica.

Palavras-chave: Soldagem; Ângulo de Ataque; Perfil de Solda; Arame Tubular; Sinais elétricos.

ABSTRACT

Welding is a fundamental manufacturing process widely employed across numerous industries, playing a crucial role in the fabrication and assembly of metallic structures and components. Among the many factors that influence weld quality and properties, the welding torch travel angle is a key process parameter. Therefore, understanding its effects is essential for optimizing welding operations and ensuring the production of high-quality welds with adequate structural integrity and mechanical performance. This study aimed to investigate the influence of different torch travel angles on the metal transfer mode, weld bead geometry, and the morphological characteristics of the weld cross-section produced using E71T1-C1A2-CS2 flux-cored wire with 100% CO_2 shielding gas on ASTM A36 steel plates. To achieve this objective, mechanized weld beads were deposited while continuously monitoring the electrical signals. After processing the collected data, average voltage and current values, heat input, oscillograms, and histograms were obtained. The results demonstrated that variations in the torch travel angle significantly affected the electrical signals, metal transfer behavior, and weld bead geometry. The 90° angle produced the highest average current (179.7A), apparent power (4,818VA), and heat input (1.4kJ/mm), resulting in the greatest penetration (1.5mm), the largest dilution area (14.6mm²), and the highest dilution ratio (35%). In contrast, the 150° angle yielded the lowest average current (134.9A), apparent power (3,593VA), and heat input (1.1kJ/mm), which were associated with the lowest penetration (0.9mm), the smallest dilution area (6.3mm²), and the lowest dilution ratio (19%), while also producing the highest average reinforcement (3.3mm). Compared with the 90° condition, increasing the torch travel angle to 150° reduced the average current, apparent power, and heat input by approximately 25%. However, the reductions in penetration (40%) and dilution (47%) were considerably greater, indicating that the observed geometric changes were not solely a consequence of the lower energy transferred to the workpiece, but also resulted from modifications in the arc direction and the dynamics of metal transfer.

Keywords: Welding; Attack Angle; Weld Profile; Flux-Cored Wire; E71T1-C1A2-CS2; Penetration; Mechanical Properties; Metallurgical Properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema do processo de soldagem a arco elétrico com núcleo fluxado FCAW 19
Figura 2 – Arames tubulares para aços de baixo teor de carbono (FCAW).....21
Figura 3 - Esquema das condições de corrente e tensão para as diferentes formas de trnasferência metálica.....24
Figura 4 - Configuração angular da tocha durante a execução dos cordões de solda 25
Figura 5 – Fluxograma das etapas do trabalho realizado 29
Figura 6 – Conjunto de soldagem e sistema para deslocamento de tocha utilizados na produção das soldas.....30
Figura 7 – Aferição do ângulo da tocha para o teste com 30° 31
Figura 8 – Posicionamento inicial da tocha de soldagem no ângulo e DBCP programados 32
Figura 9 – Reposicionamento da tocha para novo cordão.....33
Figura 10 – Cordão 60° com escória removida , defeitos vermiformes e escala.....33
Figura 11 – Interface de aquisição de dados e gráfico prévio do Power Wave Manager.....34
Figura 12 – Interface de abertura do programa Sinal.....35
Figura 13 – Oscilogramas, histograma e estatísticas do programa Sinal.....35
Figura 14 – Oscilogramas com filtro e seleção de intervalo 36
Figura 15 – Lixamento com lixa 120# da amostra 90° A.....37
Figura 16 – Lupa binocular utilizada para aproximações 6,5x e 12,5x.....37
Figura 17 – Imagem macrográfica da amostra 90° A em processo de identificação.....38
Figura 18 – Vista superior dos cordões de solda com escória e sem escória.....39
Figura 19 – Fotografias das seções transversais com cotas e regiões.....41
Figura 20 – Relação entre a largura média do cordão em função do ângulo de deposição.....42
Figura 21 – Relação entre a altura do reforço médio e a variação do ângulo de deposição.....43
Figura 22 – Relação entre a penetração média e a variação do ângulo de deposição.....44
Figura 23 - Relação entre a área e diluição com a variação do ângulo de ataque.....45
Figura 24 – Relação entre a diluição percentual e a variação do ângulo de deposição.....46
Figura 25 - Variação da tensão e corrente em função do ângulo de deposição 47
Figura 26 - Variação da potencia aparente e aporte térmico em função do ângulo.....48
Figura 27 - Oscilogramas das variações da tensão, corrente e da multiplicação V x A em função do tempo com histogramas (30°).....51
Figura 28 – Oscilogramas das variações da tensão, corrente e da multiplicação V x A em função do tempo com histogramas (60°).....51
Figura 29 – Oscilogramas das variações da tensão, corrente e da multiplicação V x A em função do tempo com histogramas (90°).....52
Figura 30 - Oscilogramas das variações da tensão, corrente e da multiplicação V x A em função

do tempo com histogramas (120°).....53
Figura 31 – Oscilogramas das variações da tensão, corrente e da multiplicação V x A em função do tempo com histogramas (150°).....53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos consumíveis tubulares e suas principais características.....20
Tabela 2 – Características dos modos de tranferência metálica em processo GMAW.....24
Tabela 3 – Parâmetros de soldagem adotados.....30

LISTA DE SIGLAS

ASME – *American Society of Mechanical Engineers* (Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos)

ASTM – *American Society for Testing and Materials* (Sociedade Americana de Testes e Materiais)

AWS – *American Welding Society* (Sociedade Americana de Soldagem)

DIN - Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão de Normalização)

DBCP – Distância entre o Bico de Contato e a Peça

FCAW - *Flux Cored Arc Welding* (Soldagem a Arco com Arames Tubulares)

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

LSC&A – Laboratório de Soldagem, Corte e Processos afins

SAW - *Submerged Arc Welding* (Soldagem Com Arco Submerso)

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS **5**
RESUMO **6**
ABSTRACT **7**
LISTA DE ILUSTRAÇÕES **8**
LISTA DE TABELAS **10**
LISTA DE SIGLAS **11**
1 INTRODUÇÃO **14**
2 OBJETIVOS **16**
2.1 Objetivo Geral **16**
2.2 Objetivos específicos **16**
3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA **17**
3.1 Importância da soldagem na indústria **17**
3.2 O Processo de Soldagem FCAW **18**
3.2.1 Arames Tubulares 19
3.2.2 Arames Tubulares Rutílicos 21
3.2.2.1 Características do Arame Tubular E71T1-C1A2-CS2 ..... *22*
3.3 Modos de transferência metálica **23**
3.4 Ângulo de ataque na soldagem **25**
3.4.1 Efeitos na Geometria da Solda 26
3.5 Estudos Anteriores e Desempenho **28**
4 MATERIAIS E MÉTODOS **29**
4.1 Preparação das chapas e ajuste de parâmetro para soldagem **29**
4.1.1 Limpeza e jateamento da superfície do substrato 30
4.1.2 Posicionamento da tocha com aferição do ângulo e DBCP 31
4.2 Deposição dos cordões e aquisição dos sinais elétricos **31**
4.2.1 Deposição dos cordões com ajuste posterior da tocha e DBCP 32
4.2.2 Limpeza e identificação dos cordões 32
4.3 Tratamento de dados da aquisição de sinais elétricos **34**
4.3.1 Obtenção de oscilogramas e gráficos 34
4.3.2 Aquisição de parâmetros elétricos e tratamento de dados 35
4.4 Cortes e preparações para análise macrográfica **36**
4.4.1 Obtenção de imagens das macrografias 37
4.4.2 Tratamento de imagens e aquisição de estatísticas morfológicas 38
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO **39**

5.1 Análise visual das soldas 39
5.2 Dimensões das soldas 41
5.3 Análise dos sinais elétricos 47
6 CONCLUSÕES 55
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 56
REFERÊNCIAS 57
ANEXOS 59
ANEXO A 58
ANEXO B 58
ANEXO C 58

1 INTRODUÇÃO

Desde sua gênese, os processos de soldagem têm evoluído significativamente, acompanhando o desenvolvimento tecnológico e as demandas da indústria. Como exemplo, destacam-se a transição dos métodos manuais para processos automatizados, como a soldagem SAW (Submerged Arc Welding – Soldagem Com Arco Submerso), GMAW (Gas Metal Arc Welding – Soldagem a Arco com Proteção Gasosa) e FCAW (*Flux Cored Arc Welding* – Soldagem a Arco com Arames Tubulares), que representam avanços importantes em qualidade, eficiência e controle das operações. (Marques, et al., 2017).

Atualmente, a área de soldagem passa por um intenso processo de modernização, impulsionado pela revolução tecnológica e digital, com a introdução de novos equipamentos, sistemas automatizados e o uso crescente de dados nos processos industriais. Tecnologias como soldagem robotizada, softwares de monitoramento e controle de parâmetros têm transformado o cotidiano das indústrias e dos profissionais da área. Com a evolução desses recursos, tornou-se mais acessível, elevando os padrões de qualidade e produtividade. Em síntese, à medida que a tecnologia se integra aos processos de soldagem, torna-se essencial que o profissional desenvolva conhecimento técnico e domínio dessas ferramentas para acompanhar as exigências da indústria moderna. (Marques, et al, 2017).

A atividade, antes baseada predominantemente em fundamentos físicos e na habilidade manual do soldador, passou a ser orientada por parâmetros digitais e sistemas de controle automatizados, que permitem maior precisão na regulagem de variáveis como corrente, tensão e velocidade de alimentação. No contexto da aplicação do arame tubular E71T1-C1A2-CS2, com proteção gasosa de dióxido de carbono (100% CO_2), sobre o metal base ASTM A36, essa evolução possibilita um controle mais rigoroso do ângulo de soldagem, da penetração e da geometria do cordão, incluindo largura, área de reforço e níveis de diluição. Como resultado, observa-se maior padronização dos processos, aumento da produtividade e melhor atendimento à crescente demanda industrial (AWS, 2021).

No contexto da soldagem, as normas técnicas e a literatura especializada buscam constantemente se adaptar às novas demandas da indústria, analisando e aperfeiçoando parâmetros já consolidados à luz das tecnologias atuais. Observa-se que, apesar dos avanços,

ainda há lacunas na compreensão de fenômenos como a formação de trincas, variações na penetração e alterações na geometria do cordão de solda, exigindo estudos mais aprofundados para melhor adequação às condições reais de aplicação. (Modenesi, 2012)

A metodologia do presente estudo baseia-se na integração entre abordagem teórica e experimental, utilizando raciocínio dedutivo sustentado por fontes bibliográficas da área de soldagem. O trabalho contou com atividades de campo realizadas em laboratório de soldagem, incluindo a preparação de placas, execução dos cordões e posterior seccionamento para análise das características geométricas e metalúrgicas. Como marco teórico, adotam-se fundamentos relacionados aos processos de soldagem com arame tubular, com ênfase no uso do E71T1-C1A2-CS2, classificado como arame tubular rutílico, cuja composição é majoritariamente baseada em óxido de titânio (AWS, 2016; ESAB, 2023).

Nesse sentido, o presente trabalho foi executado de forma a analisar a influência do ângulo de soldagem na qualidade das deposições, com ênfase na comparação entre os ângulos de 30°, 60°, 90°. 120°. e 150°. O desenvolvimento do trabalho é composto por seis partes, organizadas de forma a contemplar os principais aspectos relacionados aos processos de soldagem. Inicialmente, aborda-se a caracterização dos materiais e consumíveis utilizados, com destaque para o arame E71T1-C1A2-CS2 e o metal base empregado. Em seguida, são discutidos os fundamentos teóricos da soldagem, incluindo parâmetros como ângulo de aplicação, penetração, geometria do cordão, largura, área de reforço e diluição. Na sequência, apresenta-se a análise comparativa dos diferentes ângulos de soldagem. Também são abordados os procedimentos experimentais realizados em laboratório, incluindo a preparação, a execução e o corte das amostras. Posteriormente, são discutidos os resultados obtidos, com ênfase na identificação de descontinuidades, como trincas, e na avaliação dos parâmetros de qualidade estrutural (Marques et al., 2017).

Por fim, o trabalho apresenta uma visão geral dos processos analisados, destacando as melhores condições operacionais para garantir eficiência, produtividade e confiabilidade nas juntas soldadas. Além disso, serão realizadas análises metalográficas das amostras soldadas, observando a geometria da seção transversal e a integridade estrutural das juntas, com a finalidade de identificar a condição angular de melhor desempenho e contribuir para a compreensão da influência dos parâmetros operacionais na otimização dos processos de soldagem aplicados na indústria (Modenesi, 2012)

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência dos ângulos de ataque sobre a transferência metálica e aspectos geométricos de soldas produzidas utilizando o arame tubular E71T1-C1A2-CS2, com proteção gasosa de dióxido de carbono (100% CO_2), aplicado sobre chapas de ASTM A36.

2.2 Objetivos específicos

- Produzir soldas mecanizadas utilizando arame tubular E71T1-C1A2-CS2 em combinação com gás de proteção 100%CO_2 empregando ângulos de ataque de 30°, 60°, 90°, 120° e 150°.
- Monitorar os sinais elétricos durante a soldagem, identificando as variações dos parâmetros elétricos e aporte térmicos envolvidos.
- Realizar a medição da penetração, reforço, largura e diluição a partir das macrografias das das soldas produzidas.
- Relacionar os resultados obtidos com o ângulo de ataque utilizado.

3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Na área da fundamentação teórica da soldagem, a organização dos processos e a definição dos parâmetros encontram respaldo em normas técnicas e literatura especializada, que estabelecem a soldagem como o conjunto de condições e interações de ordem física, química e metalúrgica responsáveis pela união de materiais. Nessa perspectiva, destacam-se variáveis essenciais como ângulo de soldagem, penetração, geometria do cordão, largura, área de reforço e diluição, as quais influenciam diretamente na qualidade e no desempenho das juntas soldadas. A aplicação do arame tubular E71T1-C1A2-CS2, com proteção gasosa de dióxido de carbono (100% CO_2), sobre o metal base ASTM A36, reforça a importância do controle desses parâmetros, uma vez que sua correta combinação impacta diretamente na produtividade, na integridade estrutural e na confiabilidade dos componentes, atendendo às exigências da indústria moderna (Modenesi; Marques; Bracarense, 2018; AWS, 2021a; AWS, 2021b).

3.1 Importância da soldagem na indústria

A soldagem é um dos processos de fabricação mais importantes da indústria moderna, desempenhando papel fundamental na produção, montagem e manutenção de componentes e estruturas metálicas. Sua ampla aplicação abrange setores estratégicos como construção civil, indústria automotiva, naval, aeroespacial, petrolífera, mineração e geração de energia. A elevada versatilidade dos processos de soldagem permite a união permanente de materiais metálicos com diferentes geometrias, espessuras e propriedades, contribuindo significativamente para o desenvolvimento tecnológico e industrial. A soldagem tornou-se indispensável para a fabricação de estruturas de elevada responsabilidade, sendo considerada uma das principais tecnologias de união de materiais empregadas atualmente (Wainer; Brandi; Mello, 2018)

A integridade das juntas soldadas é determinante para o desempenho mecânico dos componentes em serviço, uma vez que falhas associadas a defeitos de soldagem podem comprometer a resistência estrutural e provocar acidentes com elevados impactos econômicos e sociais. De acordo com Kou (2020), a qualidade da junta soldada depende do controle adequado dos parâmetros operacionais e metalúrgicos envolvidos no processo, os quais influenciam diretamente a formação da zona fundida e da zona termicamente afetada (Kou, 2020).

O avanço dos processos de soldagem acompanhou a crescente demanda industrial por maior produtividade, qualidade e redução de custos. Nas últimas décadas, o desenvolvimento de fontes eletrônicas de potência, sistemas de automação, robótica e monitoramento em tempo real permitiu maior controle dos parâmetros de soldagem, resultando em processos mais estáveis e eficientes. A evolução tecnológica dos equipamentos de soldagem possibilitou melhorias significativas na repetibilidade operacional, na qualidade dos cordões e no aproveitamento dos consumíveis (Gopaluni,R. B.; Tulsyan,A.; Chachuat, B.; et al, 2022).

Entre os diversos processos disponíveis, a soldagem a arco elétrico destaca-se por sua ampla utilização industrial devido à elevada flexibilidade operacional e à possibilidade de aplicação em diferentes materiais e condições de fabricação. Dentro desse grupo, o processo FCAW apresenta elevada taxa de deposição, boa estabilidade do arco e alta produtividade, sendo amplamente empregado na fabricação de estruturas metálicas e equipamentos de grande porte. O processo FCAW combina características favoráveis de produtividade e qualidade, tornando-se uma alternativa competitiva em aplicações que exigem elevados índices de deposição e eficiência operacional (AWS, 2004).

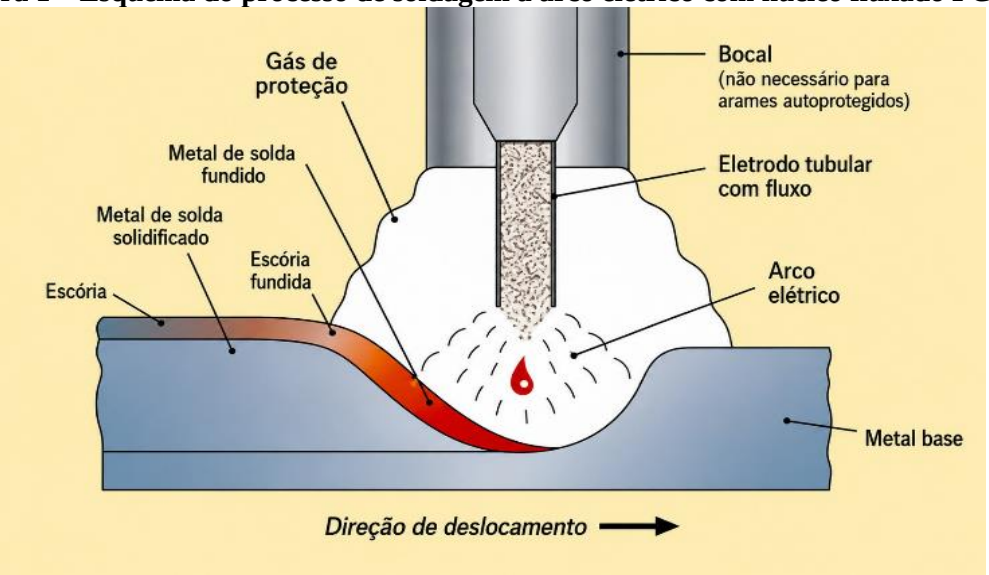
A qualidade final de uma junta soldada está diretamente relacionada aos parâmetros empregados durante a execução do processo. Variáveis como corrente, tensão, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame, distância entre o bico de contato e a peça (DBCP), tipo de gás de proteção e ângulo de ataque da tocha influenciam a estabilidade do arco, a transferência metálica, a distribuição térmica e a dinâmica da poça de fusão. Consequentemente, tais variáveis afetam características geométricas importantes, como largura do cordão, reforço, penetração e diluição. O controle adequado desses parâmetros é essencial para garantir a qualidade metalúrgica e geométrica das juntas soldadas e o estudo da influência dos parâmetros operacionais sobre o comportamento do processo e sobre a geometria dos cordões de solda (Machado, 1996).

3.2 O Processo de Soldagem FCAW

O processo FCAW é um processo de soldagem a arco elétrico que utiliza arame tubular contínuo como eletrodo consumível. Esse arame possui fluxo interno responsável por auxiliar na proteção da poça de fusão, estabilização do arco elétrico, adição de elementos de liga, e formação da escória. O processo destaca-se pela elevada produtividade, alta taxa de deposição

e ampla aplicação industrial, sendo muito utilizado nos setores metalmecânico, estrutural e de fabricação pesada. A Fig.1 ilustra o esquema do processo soldagem a arco com núcleo de fluxo (FCAW) (Starling; Modenesi; Borba, 2011).

Figura 1 – Esquema do processo de soldagem a arco elétrico com núcleo fluxado FCAW



Fonte: Adaptado de Marcos, 2026.

O processo FCAW apresenta vantagens como boa penetração, elevada produtividade, facilidade operacional e bom desempenho em diferentes posições de soldagem. Além disso, permite melhor controle da geometria do cordão e estabilidade do arco, fatores diretamente relacionados à qualidade estrutural das juntas soldadas (Starling; Modenesi; Borba, 2011).

No FCAW, a proteção da poça de fusão pode ocorrer por meio do fluxo contido no interior do arame ou pela utilização adicional de gás de proteção. No presente estudo, foi utilizado gás ativo composto por dióxido de carbono (100% CO_2), associado ao arame tubular E71T1-C1A2-CS2, aplicado sobre chapas de ASTM A36 (AWS, 2021; ESAB Brasil, 2023).

3.2.1 Arames Tubulares

Os arames tubulares são consumíveis metálicos utilizados em processos de soldagem a arco elétrico, caracterizados pela presença de fluxo em seu interior Tab.1. Esse fluxo possui funções importantes durante a soldagem, como estabilização do arco elétrico, proteção da poça de fusão, controle metalúrgico e formação da escória (Modenesi; Marques; Bracarense, 2018).

Tabela 1 – Classificação dos consumíveis tubulares e suas principais características

Tipo de Fluxo	Principais Constituintes do Fluxo	Características Principais	Hidrogênio Difusível (H) ml/100g
Rutílico	TiO_2 (rutilo), silicatos, desoxidantes	Excelente estabilidade de arco, fácil remoção de escória, ótimo acabamento do cordão, todas as posições	H8 – H16
Rutílico	TiO_2, silicatos, Ferro-liga	Alta taxa de deposição, boa aparência, uso estrutural	H8 – H16
Básico	$CaCO_3$, CaF_2, desoxidantes	Baixo hidrogênio, alta tenacidade, maior resistência à trinca	H4 – H8
Básico	Carbonatos, fluorita (CaF_2), ligas Ni	Excelente tenacidade a baixas temperaturas	H4
Auto protegido Básico-Fluorítico	CaF_2, carbonatos, geradores de gás	Não utiliza gás externo, soldagem em campo, elevada resistência mecânica	H16
Auto protegido Rutílico	TiO_2, geradores de gás e escória	Fácil aplicação em montagem e manutenção	H16
Metal Cored	Pós-metálicos, ferro, Mn, Si	Pouca escória, alta produtividade, elevada taxa de deposição	H4 – H8
Metal Cored	Pós-metálicos e desoxidantes	Excelente para soldagem robotizada e mecanizada	H4 – H8

Fonte: AWS, 2016.

Os arames tubulares podem ser classificados conforme sua composição química e aplicação, apresentando características específicas relacionadas à penetração, taxa de deposição, estabilidade do arco e acabamento do cordão de solda. Sua utilização tem crescido significativamente na indústria devido à elevada produtividade e à capacidade de produzir soldas com boas propriedades mecânicas e metalúrgicas. Além disso, apresentam bom desempenho em aplicações estruturais, especialmente quando associados a processos automatizados ou semiautomatizados, contribuindo para redução de retrabalho e aumento da eficiência operacional (AWS, 2016; ESAB, 2023; Lima, 2022).

Como os demais consumíveis para soldagem ao arco elétrico, esses são em sua grande maioria classificados por normas. As classificações mais comuns são as estabelecidas pela AWS (*American Welding Society*), que também são adotadas pelo Código ASME. Os arames fluxados, em cada classificação, apresentam especificações, caraterísticas, composição química, desempenho próprios, que os diferenciam nas suas aplicações conforme o exemplo da Fig.2 que apresenta as especificações AWS A5.20 e A5.36.

Figura 2 – Arames tubulares para aços de baixo teor de carbono (FCAW)

ARAMES TUBULARES (FCAW) (SOLDAGEM COM GÁS DE PROTEÇÃO)
ARAMES TUBULARES OK PARA AÇOS DE BAIXO E MÉDIO TEOR DE CARBONO

ESAB

Dual Shield 71SR

Arame tubular rutílico, para soldagem em todas posições. Especialmente desenvolvido para aplicações com demanda de tratamento térmico de alívio de tensões prolongado. Indicado para soldagem de esferas de armazenamento de gás e construção offshore.

Classificações Metal de Solda:	ASME SFA 5.20: E71T-1/9CJ, E71T-1CJ, E491T-1CJ, E491T-9CJ ASME SFA 5.36: E71T1-C1A4-CS2, E71T1-C1P2-CS2 EN ISO 17632-A: T46 6 P C1 1 H5

Aprovações:	FBTS ABS 5Y400 H10 (CO2) DNV-GL V YMS (H10) BV SA 5Y HH (CO2) LR DXVudO BF 5Y40 H10 NA (C1)

Aprovações são baseadas na localização da fábrica. Contacte a ESAB para mais informações.

Tipo de Liga:	Aço carbono
Tipo de Corrente:	CC+

Propriedades Mecânicas Típicas

Condição	Limite de Escoamento	Limite de Resistência	Alongamento
100% CO2			
Como soldado	560 MPa	605 MPa	29 %
Como tratado (630 °C c/10,5h)	440 MPa	510 MPa	35 %

Teste Charpy

Condição	Temperatura	Impacto
100% CO2		
Como soldado	-40 °C	150 J
Como tratado (630 °C c/10,5h)	-30 °C	60 J

Composição Química (%)

C	Si	Mn
0.05	0.35	1.05

Informação Técnica Adicional

Diâmetro	Corrente	Tensão	Rendimento	Taxa de Deposição
1.2 mm	150 A 120 A 150 A 180 A 210 A 250 A 280 A	20 V 24 V 26 V 28 V 30 V 32 V 34 V	85 % 85 % 85 % 85 % 85 % 85 % 90 %	1.27 kg/h 1.70 kg/h 2.25 kg/h 2.92 kg/h 3.72 kg/h 5.00 kg/h 6.08 kg/h

Fonte: Adaptado de ESAB, 2026.

3.2.2 Arames Tubulares Rutílicos

Os arames tubulares rutílicos caracterizam-se pela presença predominante de compostos à base de óxidos de titânio em seu fluxo interno. Essa composição proporciona maior estabilidade do arco elétrico, facilidade de abertura do arco, menor geração de respingos e melhor acabamento superficial do cordão de solda. Entre os consumíveis desse grupo, destaca-se o arame tubular E71T1-C1A2-CS2, amplamente utilizado em aplicações estruturais e industriais devido à sua elevada produtividade e boa soldabilidade de forma que visa garantir

juntas de alta responsabilidade. Quando associado ao gás de proteção dióxido de carbono (100% CO_2), esse consumível apresenta boa penetração e estabilidade operacional, favorecendo a formação de cordões homogêneos e com adequada integridade estrutural. Os arames rutílicos também se destacam pela facilidade operacional e pela capacidade de produzir soldas com menor incidência de descontinuidades (AWS, 2016; ESAB, 2023.

3.2.2.1 Características do Arame Tubular E71T1-C1A2-CS2

O arame tubular AWS E71T1-C1A2-CS2 é classificado no processo como *flux cored*, ou seja, possui um núcleo interno não metálico e deve ser soldado empregando gás de proteção (FCAW-G), oferecendo diversas vantagens em comparação com outros tipos de consumíveis de soldagem. Sua eficiência é notável, combinando alta taxa de deposição com a capacidade de soldar em várias posições e penetração, o que torna esse processo mais eficiente. A versatilidade deste arame é evidente, sendo adequado para uma ampla gama de aplicações, desde a soldagem de aços carbono até aços de baixa liga, em diferentes indústrias. Ele produz soldas de alta qualidade com boa aparência, integridade estrutural e excelentes propriedades mecânicas, como resistencia a fadiga (Scotti, 2008).

Ele possui um núcleo não metálico rútilico preenchido, composto principalmente por dióxido de titânio e óxido de cálcio. Além desses, o fluxo é uma mistura de elementos de liga, agentes de desoxidação e outros componentes que contribuem para a formação e proteção da poça de fusão. Os elementos de liga, como manganês e silício, melhoram as propriedades mecânicas da solda, enquanto os agentes de desoxidação, como alumínio e titânio, removem o oxigênio da poça de fusão, evitando a formação de óxidos indesejados. Além disso, os agentes formadores de escória ajudam a criar uma camada protetora sobre a poça de fusão, protegendo-a da contaminação atmosférica. Elementos de refino de grão, como boro e cromo, controlam a microestrutura da solda, melhorando suas propriedades mecânicas (Scotti, 2008).

As propriedades mecânicas do arame tubular E71T1-C1A2-CS2 são altamente favoráveis para uma ampla gama de aplicações industriais. Ele apresenta uma tensão de escoamento geralmente na faixa de 480 a 620 MPa, garantindo que a solda possa suportar altas cargas sem falhar. A ductilidade é outra característica importante, com alongamento geralmente superior a 20%, permitindo que a solda suporte deformações sem ruptura. A tenacidade do arame tubular E71T1-C1A2-CS2, ou seja, sua resistência ao impacto, é

excelente, mesmo em temperaturas baixas, o que é crucial para aplicações em ambientes adversos (Scotti, 2008).

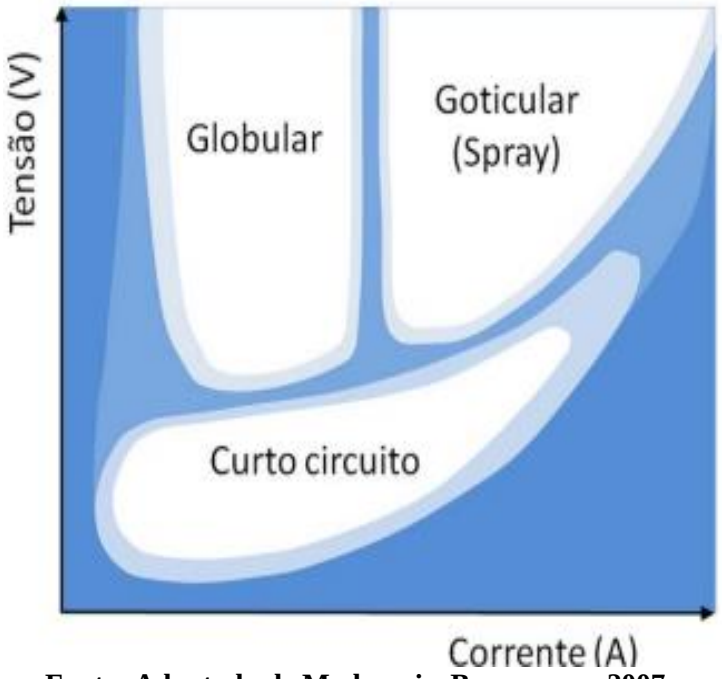
Além das propriedades mecânicas, o arame tubular E71T1-C1A2-CS2 é conhecido por suas boas propriedades da solda. Ele permite uma alta taxa de deposição de material de solda, aumentando a eficiência do processo de soldagem. Sua facilidade de uso em várias posições, incluindo plana, horizontal, vertical e sobrecabeça, proporciona flexibilidade para diferentes aplicações. Outra vantagem é a baixa projeção, que minimiza a quantidade de respingos durante a soldagem, resultando em menos retrabalho e limpeza. A boa ação de escória do arame E71T1-C1A2-CS2 facilita a remoção da escória, simplificando a inspeção e a finalização da solda (Scotti, 2008).

3.3 Modos de transferência metálica

A transferência metálica corresponde ao modo pelo qual o metal fundido é transferido do eletrodo para a poça de fusão durante o processo de soldagem. Esse fenômeno exerce influência direta sobre a estabilidade do arco elétrico, formação do cordão, penetração, geração de respingos e qualidade final da junta soldada. Nos processos de soldagem com arame tubular, a transferência metálica está associada às variáveis operacionais do processo, como corrente, tensão, velocidade de alimentação do arame, composição do gás de proteção e posicionamento da tocha (Modenesi; Bracarense, 2007).

Os principais modos de transferência metálica observados na soldagem são curto-circuito, globular e spray. Na transferência globular, o metal é transferido em gotas maiores e menos uniformes, ocorrendo maior incidência de respingos e menor estabilidade do arco. Já na transferência spray, irá ocorrer por meio de pequenas gotas de metal fundido em alta frequência, proporcionando maior estabilidade, melhor acabamento superficial e maior taxa de deposição. Na transferência metálica por curto circuito, há o contato do metal fundido com a interface da poça de fusão, gerando um curto por diferença de potencial que irá efetuar a transferência do arame fundido. A Fig. 3 mostra esquematicamente a relação entre a corrente e tensão de soldagem para as três formas básicas de transferência na soldagem GMAW com um gás de proteção rico em argônio (Modenesi; Bracarense, 2007).

Figura 3 - Esquema das condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência metálica



Fonte: Adaptado de Modenesi e Bracarense, 2007.

Entre esses modos, destaca-se ainda a transferência híbrida entre o modo globular e o spray, caracterizada por apresentar comportamento intermediário entre ambos os mecanismos Tab.2. Nesse regime, observa-se redução parcial dos respingos e melhoria da estabilidade do arco em comparação ao modo globular convencional, sem atingir totalmente as características de transferência spray pura (Bauné; Bonnet; Liu, 2001).

Esse comportamento híbrido é frequentemente observado em determinadas faixas operacionais dos processos FCAW, especialmente quando se utilizam gases ativos, como o dióxido de carbono (100% CO_2), influenciando diretamente a geometria do cordão e a penetração (Bauné; Bonnet; Liu, 2001).

Tabela 2 – Características dos modos de transferência metálica em processo GMAW

Modo de transferência	Tensão no arco	Densidade de corrente	Energia de soldagem	Soldagem fora da posição	Penetração
Curto-circuito	Baixa	Baixa	Baixa	Sim	Pequena
Globular	Média	Baixa	Média	Não	Média
Spray	Alta	Alta	Alta	Depende	Grande
Pulsada	Alta	Média	Média	Sim	Grande

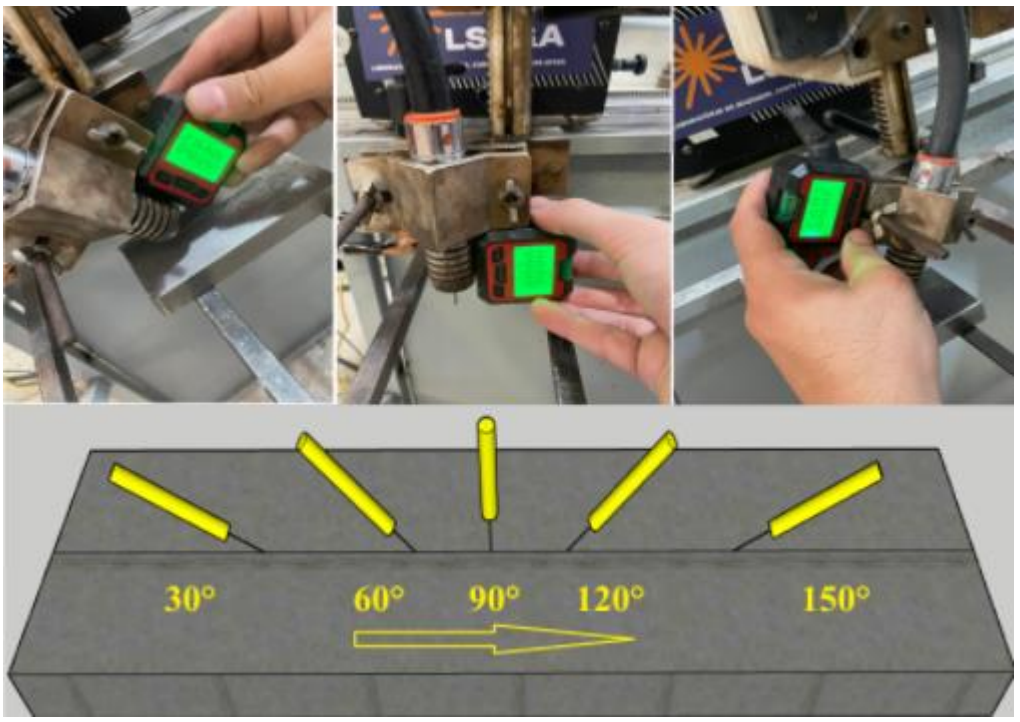
Fonte: Adaptado de Acesita, 2011.

3.4 Ângulo de ataque na soldagem

O ângulo de ataque, Fig. 4, é definido como o formado entre o eletrodo de soldagem e a superfície do material de base. Este parâmetro é crucial na soldagem, pois afeta diretamente os resultados obtidos (Modenesi; Marques; Bracarense, 2018).

Ele apresenta particularidades relevantes, uma vez que não atua de forma isolada e tampouco depende apenas da posição física do operador, mas sim da interação com diversos parâmetros do processo. Diferentemente de uma análise simplificada, o ângulo influencia diretamente a direção do arco elétrico e a transferência metálica, afetando a penetração, a geometria do cordão, a largura, a área de reforço e a diluição. Nesse contexto, pequenas variações podem gerar mudanças significativas no resultado final, independentemente de outras condições aparentemente constantes (Ponomarev; Scotti, 2008).

Figura 4 - Configuração angular da tocha durante a execução dos cordões de solda



Fonte: Autoria própria, 2026.

Sendo assim, na prática, seu controle é essencial para garantir a estabilidade do processo e a qualidade estrutural da junta soldada. Na aplicação do arame tubular E71T1-C1A2-CS2, com proteção gasosa de dióxido de carbono (100% CO_2), sobre o metal base ASTM A36, a variação

pode impactar diretamente o formato do cordão e a ocorrência de descontinuidades, como trincas e falta de fusão. Dessa forma, a literatura técnica evidencia que o domínio dessa variável é indispensável para otimizar a produtividade, atender à crescente demanda industrial e assegurar padrões adequados de qualidade e confiabilidade nas estruturas soldadas (Ponomarev; Scotti, 2008).

O ângulo de ataque revela-se uma variável crítica, cujos efeitos podem ser amplos e, muitas vezes, de difícil identificação imediata, especialmente quando não há controle adequado durante a execução. Pequenas variações no ângulo podem gerar consequências significativas na qualidade do cordão, como alterações na penetração, na geometria, na largura, na área de reforço e na diluição, podendo resultar em descontinuidades como trincas, falta de fusão ou inclusões. Essa complexidade é agravada pela interação simultânea entre diversos parâmetros do processo, o que exige elevado nível de conhecimento técnico por parte do profissional (Ponomarev; Scotti, 2008).

Nesse contexto, a correta definição e manutenção tornam-se tarefas desafiadoras, especialmente diante das exigências de alta produtividade e da crescente demanda industrial. Na aplicação do arame tubular E71T1-C1A2-CS2, com proteção gasosa de dióxido de carbono (100% CO_2), sobre o metal base ASTM A36, a variação pode impactar diretamente a estabilidade do arco e a distribuição térmica, refletindo na qualidade estrutural da junta. Dessa forma, a literatura técnica evidencia que o domínio do ângulo de soldagem é essencial para minimizar defeitos, otimizar os parâmetros operacionais e garantir confiabilidade, segurança e desempenho adequado das estruturas soldadas (Modenesi; Marques; Bracarense, 2018; Ferreira et al., 2021).

3.4.1 Efeitos na Geometria da Solda

A geometria da solda, incluindo profundidade de penetração, largura e altura do cordão, é fortemente influenciada pelo ângulo de ataque. Ângulos menores tendem a aumentar a penetração, enquanto ângulos maiores podem resultar em soldas mais largas e menos profundas. Este comportamento é explicado pela distribuição de calor e pelo fluxo de material durante a soldagem (Azevedo et al., 2021).

A penetração da solda é um dos aspectos mais críticos influenciados pelo ângulo de ataque. Pesquisas mostram que ângulos de ataque menores, tipicamente entre 30° e 45°,

promovem uma penetração mais profunda, permitindo uma fusão mais completa entre o material de base e o material de solda. Esta penetração profunda é crucial para aplicações onde a resistência estrutural é uma prioridade (Kou, 2020).

Por outro lado, ângulos de ataque maiores, como aqueles superiores a 60° são indicados para juntas de angulo e de topo, por em outras juntas podem resultar em uma penetração superficial, inadequada para aplicações que requerem alta resistência mecânica. Estudos do Correia (2021) e Bauné (2001) confirmam que a escolha do ângulo de ataque correto é essencial para garantir a qualidade e a durabilidade da solda (Azevedo et al., 2021).

A largura e a forma do cordão de solda também são fortemente influenciadas pelo ângulo de ataque. Pesquisas indicam que ângulos de ataque menores tendem a produzir soldas mais estreitas e profundas, enquanto ângulos maiores resultam em soldas mais largas e rasas. Este comportamento pode ser explicado pela distribuição de calor e pelo fluxo de material durante o processo de soldagem (Bauné et al., 2001).

A forma do cordão de solda é essencial para garantir uma distribuição uniforme de tensões e minimizar o risco de falhas prematuras. Estudos de Scotti (2008) demonstram que uma solda com geometria otimizada pode melhorar significativamente o desempenho mecânico da junta soldada, reduzindo a incidência de defeitos como trincas e porosidades.

As propriedades mecânicas e metalúrgicas da solda são diretamente afetadas pelo perfil da solda, que é influenciado pelo ângulo de ataque. Uma penetração adequada e uma distribuição homogênea do material de solda são essenciais para garantir uma boa resistência mecânica e integridade estrutural. Estudos indicam que ajustes no ângulo de ataque podem ser utilizados para otimizar estas propriedades, resultando em soldas com melhor desempenho (Correia, 2021).

A microestrutura da zona fundida é outro aspecto crítico influenciado pelo ângulo de ataque. Variações na distribuição de calor podem resultar em diferentes microestruturas, que afetam a dureza, tenacidade e resistência à fratura da solda (Scotti, 2008). Por exemplo, uma microestrutura mais fina e homogênea geralmente proporciona melhor desempenho mecânico, enquanto uma microestrutura grosseira pode ser mais suscetível a falhas (Azevedo et al., 2021).

3.5 Estudos Anteriores e Desempenho

Diversos estudos relatam o desempenho do arame tubular E71T1-C1A2-CS2 em aplicações envolvendo a soldagem de aços carbono e baixa liga. Scotti (2008) e Bauné et al. (2001) destacam a boa estabilidade operacional, a elevada taxa de deposição e as propriedades mecânicas adequadas obtidas com esse consumível.

Os estudos disponíveis também demonstram que o ângulo de ataque influencia diretamente a geometria do cordão e as características da junta soldada. Variações desse parâmetro podem alterar a penetração, a largura do cordão, a área de reforço e a diluição, afetando o desempenho do processo e a qualidade final da solda (Ferreira et al., 2021; Modenesi; Marques; Bracarense, 2018).

Na aplicação do arame tubular E71T1-C1A2-CS2 com proteção gasosa de dióxido de carbono (100% CO_2) sobre aço ASTM A36, o controle do ângulo de ataque é apontado como um fator relevante para a estabilidade do arco e para a obtenção de características geométricas adequadas do cordão de solda (Correia, 2021).

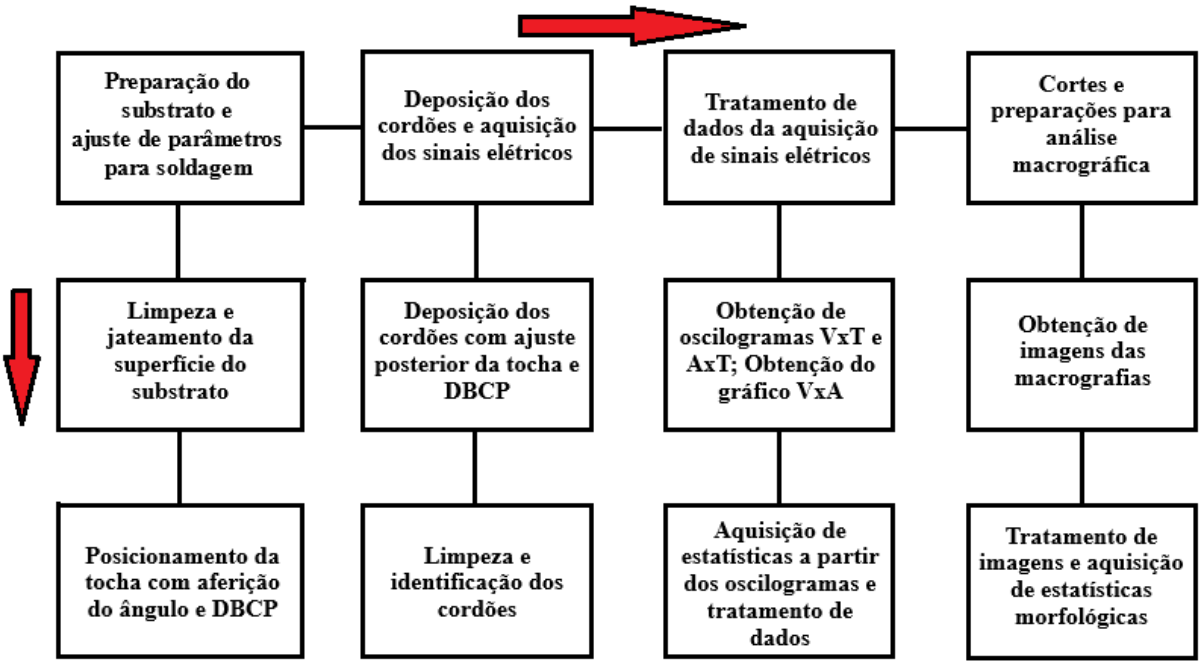
Dessa forma, os estudos anteriores indicam que o ajuste adequado dos parâmetros operacionais, especialmente do ângulo de ataque, contribui para a redução de descontinuidades e para a obtenção de juntas soldadas com características compatíveis com os requisitos de qualidade exigidos nas aplicações industriais (Modenesi; Marques; Bracarense, 2018; Ferreira et al., 2021).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento experimental foi estruturado de forma sequencial, contemplando as etapas de preparação das chapas, produção dos cordões de solda e análise das amostras obtidas, cujo o fluxograma apresentado abaixo na Fig. 5 resume as etapas empregadas durante o desenvolvimento experimetal do estudo.

Todos os ensaios foram realizados no laboratório de soldagem e no laboratório de metalografia, ambientes devidamente equipados para a realização das etapas experimentais e análise dos resultados.

Figura 5 – Fluxograma das etapas do trabalho realizado



Fonte: Autoria própria, 2026.

4.1 Preparação das chapas e ajuste de parâmetro para soldagem

No presente estudo, foram considerados aspectos como a preparação da chapa de ASTM A36, incluindo medição dimensional com paquímetro, retirada de rebarbas e jateamento com óxido de alumínio, bem como o controle dos parâmetros de soldagem conforme a Tab.3 e a Fig.6 respectivamente. Na operação de deposição dos cordões de solda, foi utilizado um conjunto de soladgem sinérgico multiprocesso Lincoln Electric Powerwave 350 equipado com alimentador de arame LF45. De modo a garantir repetibilidade a operação foi realizada

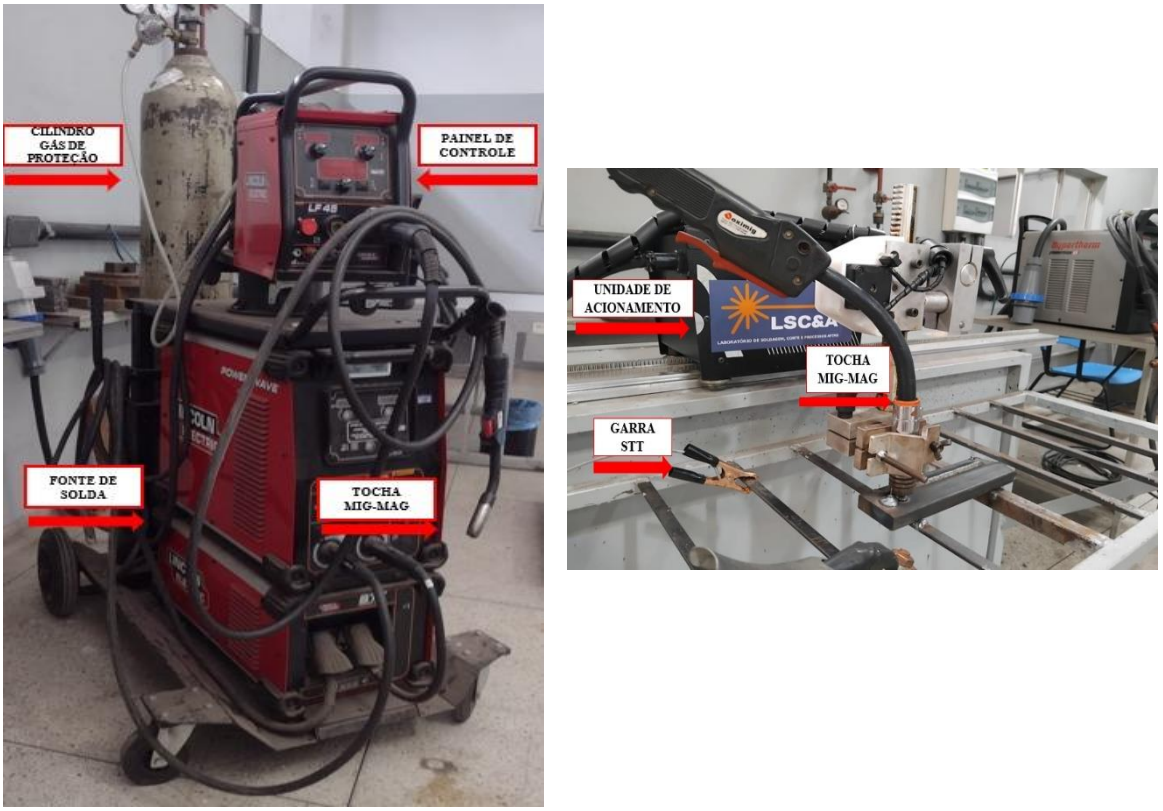
empregando um sistema automático para deslocamento de tocha marca IMS modelo Tartílope V2 adaptado (3 eixos) .

Tabela 3 – Parâmetros de soldagem adotados

Tensão (V)	WFS (m/min)	VS (mm/min)	DBCP (mm)	Comprimento do cordão (mm)	Gás 100% CO_2 Vazão (L/min)
27	7,01	200	25	90	15

Fonte: Autoria própria, 2026.

Figura 6 – Conjunto de soldagem e sistema para deslocamento de tocha utilizados na produção das soldas



Fonte: Autoria própria, 2026.

4.1.1 Limpeza e jateamento da superfície do substrato

Foi selecionada uma chapa de aço ATMS A36 com dimensões aferidas de 125mm x 331mm e 19,68mm de espessura (ANEXO C), e foram realizadas verificações superficiais, constatando-se a necessidade de um jateamento para remoção de óxidos superficiais. O jateamento foi realizado em uma cabine isolada utilizando um jato de óxido de alumínio comprimido e seguindo de uma limpeza dos finos com auxílio de uma pistola de ar comprimido

da cabine de jateamento. A superfície da chapa na qual executou-se os cordões, foram marcadas com auxílio de um riscador de forma a separar em cinco regiões de mesmo tamanho para deposição dos cordões.

Para as aferições dimensionais, utilizou-se paquímetro universal analógico, com resolução de 50 micrômetros. Como instrumento auxiliar, foi empregada régua graduada milimetrada, para a marcação e conferência das medidas durante o preparo das amostras.

4.1.2 Posicionamento da tocha com aferição do ângulo e DBCP

Após a limpeza da superfície e marcação das regiões de deposição, foram realizadas as ajustagens da tocha e da DBCP com 25 mm atentando-se para o ângulo de saída do arame consumível conforme a Fig.7 em cada cordão seguindo-se a seguinte ordem: 30°; 60°; 90°; 120°; 150°.

Figura 7 – Aferição do ângulo da tocha para o teste com 30°



Fonte: Autoria própria, 2026.

4.2 Deposição dos cordões e aquisição dos sinais elétricos

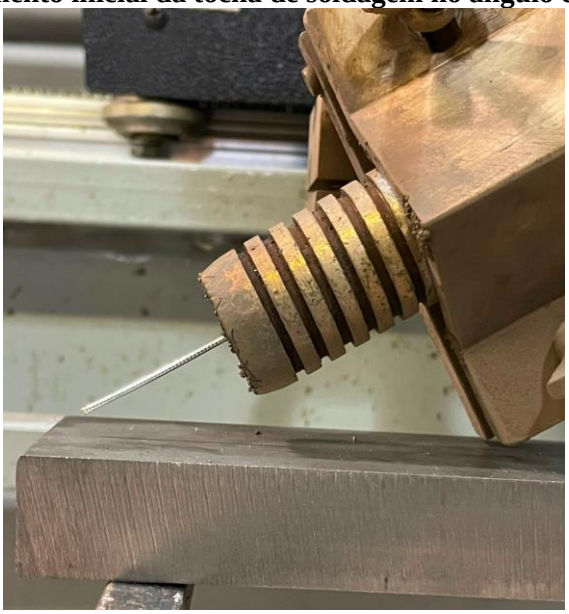
Após a aferição do ângulo da tocha e do DBCP, foi executada a deposição dos cordões de solda seguindo os parâmetros apontados pela Tab.3, com aquisição dos sinais elétricos.

4.2.1 Deposição dos cordões com ajuste posterior da tocha e DBCP

Por meio de um cabo ethernet, foi possivel a conexão da fonte de soldagem com o computador do laboratório, de forma a realizar a aquisição de sinais elétricos utilizando o software Power Wave Manager, enquanto foi utilizado o software UGS (Universal G-Code Sender) para o acionanmento e a translação da tocha ao longo do eixo x com posterior interrupção da ignição da tocha com o programa previamente escrito em linguagem de uso em CNC, G-Code.

Ao final da deposição do cordão, foram salvos os rastreamentos de sinais elétricos, seguindo-se de um reposicionamento da tocha na região da nova deposição com a adequação do próximo ângulo da tocha, seguindo-se a sequência de (30, 60, 90, 120 e 150)° respectivamente, atendando-se para a a manutenção da DBCP em cada cordão, conforme ilustrado pela Fig.8 abaixo.

Figura 8 – Posicionamento inicial da tocha de soldagem no ângulo e DBCP programados



Fonte: Autoria própria, 2026.

4.2.2 Limpeza e identificação dos cordões

Após o resfriamento natural da chapa, concedeu-se com os seguintes procedimentos: o registro fotográfico, a remoção de escória e a limpeza com escova de aço rotativa seguindo-se com o reposicionamento da tocha para a próxima deposição conforme a Fig.9.

Figura 9 – Reposicionamento da tocha para novo cordão



Fonte: Autoria própria, 2026.

Como a escória apresentou uma condição sobrenadante uniforme, foi possível a sua remoção em partes quase intactas, como uma capa sobre o cordão, conforme a Fig.10 para identificação e registro.

Figura 10 – Cordão 60° com escória removida , defeitos vermiformes e escala



Fonte: Autoria própria, 2026.

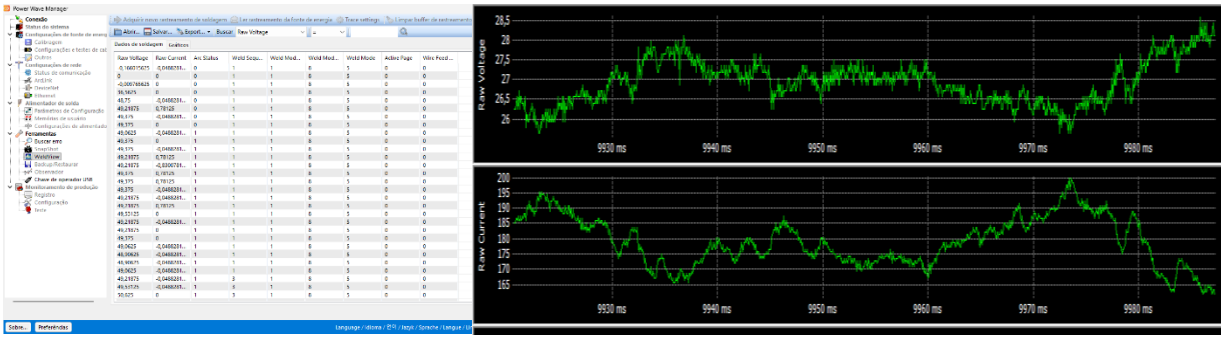
4.3 Tratamento de dados da aquisição de sinais elétricos

Ao realizar a deposição de cada cordão, a fonte de soldagem foi integrada com o software da Lincoln Electric Power Manager Fig.11, possibilitando a aquisição em tempo real dos sinais elétricos e até mesmo a criação de um programa personalizado para o presente estudo, com as respectivas variáveis de controle sendo determinadas fora do painel da fonte. Os sinais foram obtidos com a frequência de aquisisção escolhida para 15kHz, de forma que assim, possibilitasse a aquisição em todo o processo de deposição com a quantidade de pontos que possibilitasse a determinação estatística das médias, e demais características dos oscilogramas.

4.3.1 Obtenção de oscilogramas e gráficos

Realizou-se a aquisição utilizando o programa da fabricante da fonte, com frequência de 15 kHz, entretando para a obtenção dos oscilogramas e estatísticas, uma série de dados foram desprezados ou tratados de forma a avaliarmos os essencial que eram respectivamente a variação da tensão e da corrente em função do tempo, assim foi possível a determinação não somente das estatísticas de média, como também do aporte térmico e consequentemente dos gráficos dos oscilogramas.

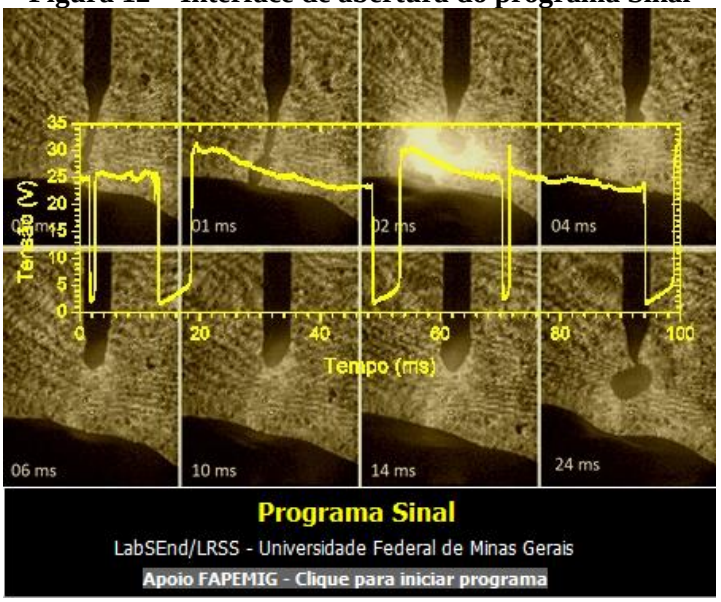
Figura 11 – Interface de aquisição de dados e gráfico prévio do Power Wave Manager



Fonte: Autoria própria, 2026.

Para a obtenção dos oscilogramas e estatísticas, utilizou-se o programa Sinal (Fig.12) , de autoria do Professor Dr. Paulo José Modenesi da UFMG, de forma que ao tratar os sinais obtidos da fonte,configurou-se para a exibição de tabulação e dessa forma tornou-se possível a criação dos canais de entrada, Tempo (s); Tensão (V); Corrente (A). Assim, foi realizada para cada cordão a importação do arquivo tabulado no formato texto.

Figura 12 – Interface de abertura do programa Sinal

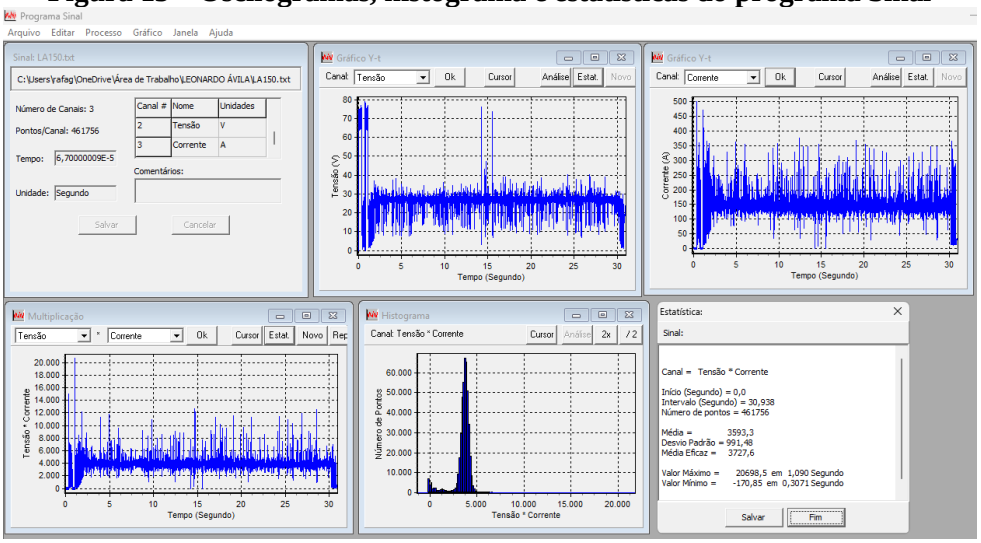


Fonte: Autoria própria, 2026.

4.3.2 Aquisição de parâmetros elétricos e tratamento de dados

Ao processar os sinais obtidos utilizando o programa Sinal, foi possível obter os oscilogramas de tensão por tempo, corrente por tempo, além do gráfico de multiplicação da tensão por corrente e seu respectivo histograma (Fig.13). Para cada oscilograma foi recuperada uma estatística com informações de valores médios, máximos e mínimos, além do desvio padrão, que serviram para a análise estatística posterior (ANEXOS A e B).

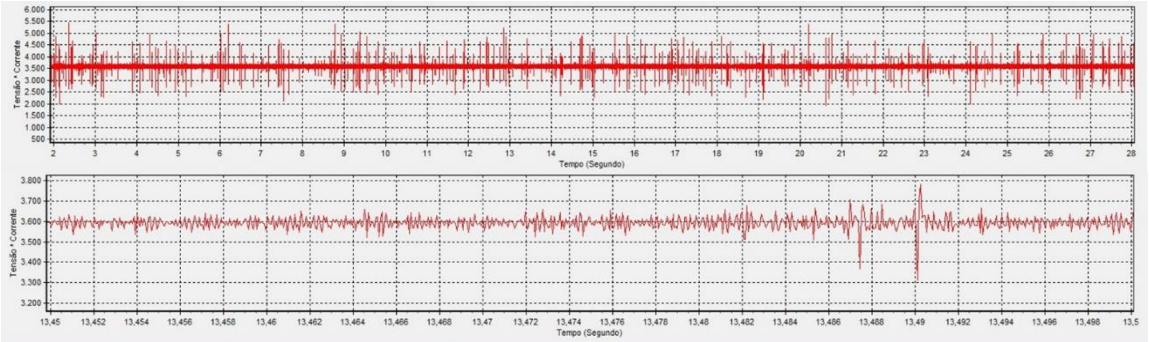
Figura 13 – Oscilogramas, histograma e estatísticas do programa Sinal



Fonte: Autoria própria, 2026.

Como os dados do arquivo de texto estavam com todas as leituras, a plotagem dos oscilogramas mostravam ruídos e interferências, o que poderia influenciar a interpretação dos dados estatísticos e até mesmo a caracterização do modo de transferência, então foram realizados filtros de passa alta e a posterior seleção dos intervalos adequados, sendo considerados primeiramente o intervalo de 2 a 28 segundos e depois uma seleção aproximada entre os intervalos de 13 e 14 segundos, conforme a Fig.14. Seguindo-se então com o cálculo das médias e posteriormente com o cálculo do desvio padrão amostral.

Figura 14 – Oscilogramas com filtro e seleção de intervalo



Fonte: Autoria própria, 2026.

4.4 Cortes e preparações para análise macrográfica

Para o corte das amostras, foi utilizado disco de corte abrasivo, composto majoritariamente por óxido de alumínio, com dureza aproximada de 35 HRC, adequado para o corte do material utilizado.

Para a preparação metalográfica, foram utilizados equipamentos com lixas (120, 240, 320, 400 e 600#) de bancada conforme a Fig.15. Os lixamentos foram realizados em ordem cruzada para a remoção de irregularidades e planos preferenciais, seguindo-se de limpeza em água corrente e álcool etílico com secagem posterior. Prosseguiu-se com o ataque químico para revelação macrográfica utilizando-se reagente de solução Nital 5%. Durante os procedimentos que envolvem geração de vapores e partículas, foi utilizada capela de exaustão de gases (modelo BZ 150), assegurando condições adequadas de segurança.

Figura 15 – Lixamento com lixa 120#



Fonte: Autoria própria, 2026.

4.4.1 Obtenção de imagens das macrografias

Para análise das amostras, foi utilizado microscópio estereoscópico (lupa binocular) ilustrado pela Fig.16, equipado com câmera digital, permitindo a observação detalhada e o registro das características dos cordões de solda.

Figura 16 – Lupa binocular utilizada para aproximações 6,5x e 12,5x

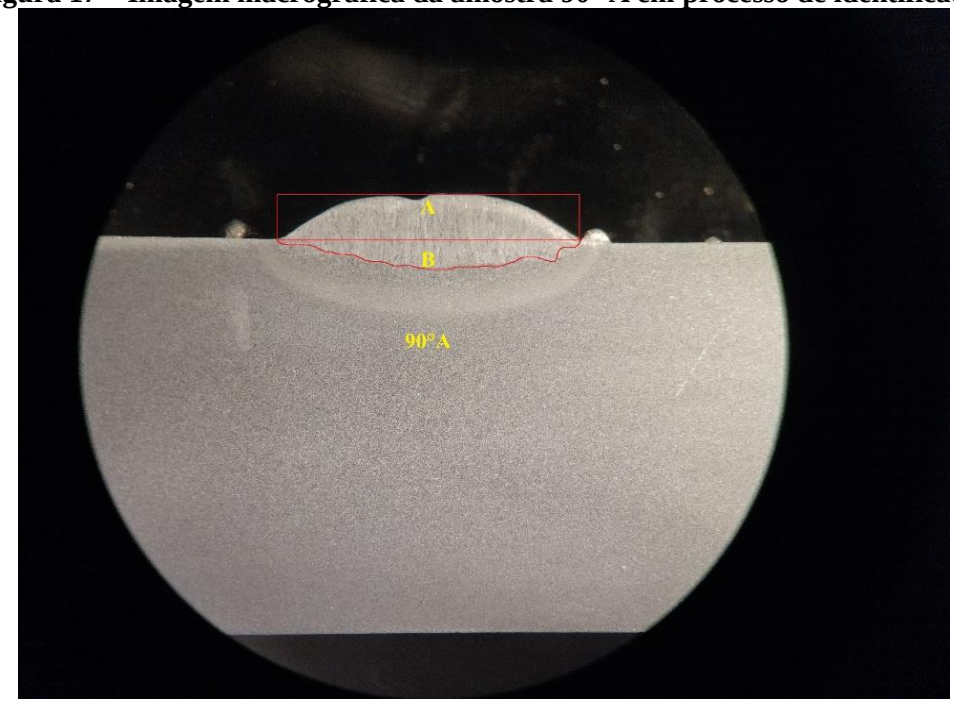


Fonte: Autoria própria, 2026.

4.4.2 Tratamento de imagens e aquisição de estatísticas morfológicas

Após a obtenção das imagens macrográficas nas apliações de 6,5x e 12,5x respectivamente, foi utilizado o programa para tratamento de imagens e medições com base em escala denominado ImageJ. Realizou-se a parametrização da escala com base na espessura conhecida do substrato de aproximadamente 19,68mm e a partir desta escala, foram apontadas e delimitadas as áreas e regiões de interesse Fig.17. Assim, adotou-se as seguintes legendas: a área A (mm^2) correspondente ao reforço e hy(mm) a sua altura, a área B (mm^2) correspondente a diluição e hz (mm) a sua altura denominada apenetração , a largura do cordão LW (mm).

Figura 17 – Imagem macrográfica da amostra 90° A em processo de identificação



Fonte: Autoria própria, 2026.

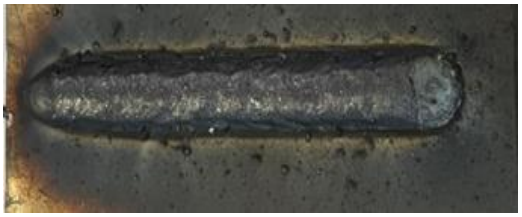
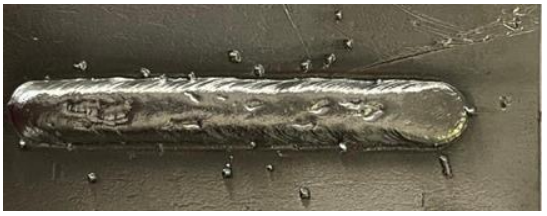
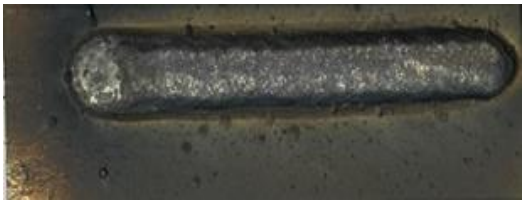
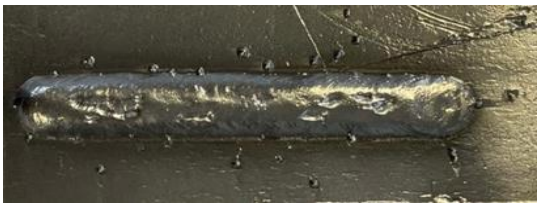
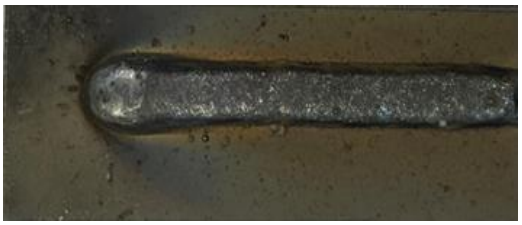
A partir das medidas coletadas, foram realizadas análises e apontamentos estatísticos de forma a verificar a presença de diferenças significativas entre as médias e conhecer os valores de diluição, penetração e reforço para cada cordão depositado. A diluição foi deteminada como sendo a fração da área B sobre a soma das áreas A+B, o valor foi multiplicado por 100 para obter o valor percentual. A penetração foi determinada como a maior profundidade que o material fundiu, ou seja, a parte mais profunda de diluição. Seguindo-se então com o cálculo das médias e posteriormente com o cálculo do desvio padrão amostral.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise visual das soldas

Após a deposição, foram retiradas fotografias com e sem escória, conforme a Figura 18.

Figura 18 – Vista superior dos cordões de solda com escória e sem escória

Ângulo (°)	Com Escória	Sem Escória
30		
60		
90		
120		
150		

Fonte: Autoria própria, 2026.

Conforme exposto na Tab.4 acima, pode-se observar a formação de cordões uniformes, destacando-se os cordões dos ângulos de 60°, 90°, 120° e 150° respectivamente, entretanto foram observadas nas mesmas amostras, formações de marcas superficiais superiores denominadas vermiformes, destacando-se as amostras 60° e 90°, que apresentaram também a presença de mais respingos que as demais amostras. As escórias em cada amostra apresentaram um perfil uniforme e foram removidas em volumes inteiros soltos sobre os cordões, indicando uma condição sobrenadante condizente com uma combinação de fatores térmicos, químicos e operacionais. O principal motivo é a contração e a diferença de dilatação térmica entre o metal solidificado e a escória (Andrade, 2007; Modenesi, P. J. et al.,2014).

A formação de porosidade vermiformes superficial na soldas produzidas com arames tubulares rutílicos e gás 100% CO_2 pode ocorrer devido ao aprisionamento de gases que tentam escapar da poça de fusão durante a rápida solidificação do metal. O CO_2 puro possibilita a formação de um arco elétrico com modo de transferência predominantemente globular, com característica mais violenta e propensa a turbulências. A turbulência, em uma situação que se a tensão estiver muito alta, o arco irá alongar excessivamente, decompondo o gás e aspirando o ar atmosférico (Andrade, 2007; Hobart Brothers, 2026; Lincoln Eletric, 2026; Modenesi, P. J. et al.,2014).

Esse efeito de turbulência pode ser agravado se um DBCP muito curto for adotado, o que impede o correto pré-aquecimento do fluxo interno do arame e a eliminação prévia de sua umidade natural. Como consequência, tem-se possibilidade de o hidrogênio da umidade residual e os gases gerados pela reação do arco ficarem retidos sob a escória rutílica pesada, característica desse arame esculpindo os canais e sulcos alongados na superfície do cordão (Andrade, 2007; Hobart Brothers, 2026; Lincoln Eletric, 2026; Modenesi, P. J. et al.,2014).

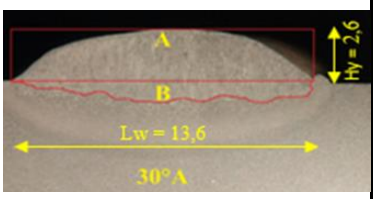
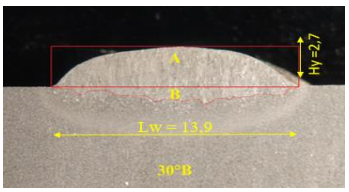
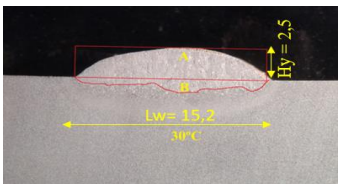
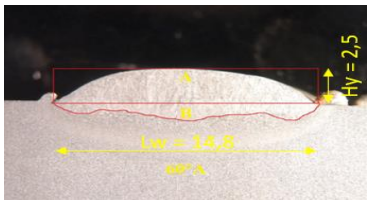
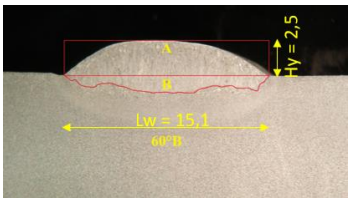
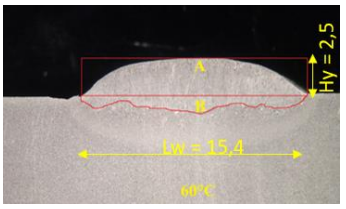
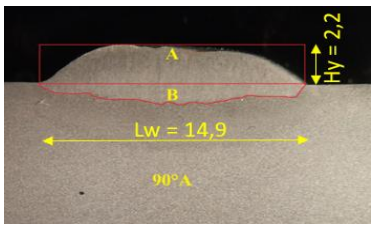
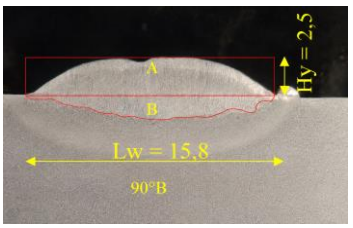
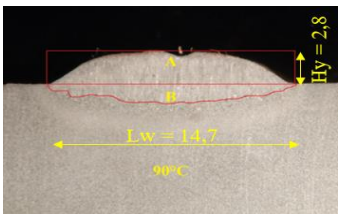
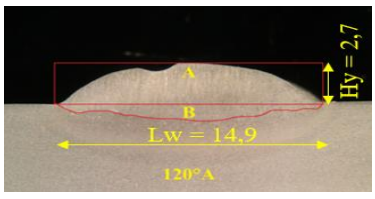
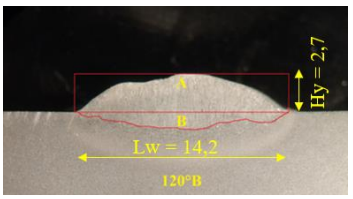
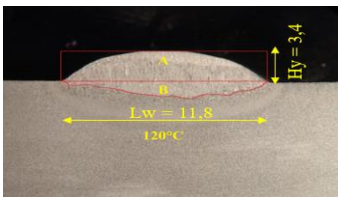
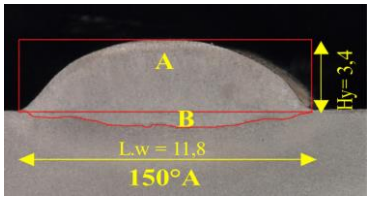
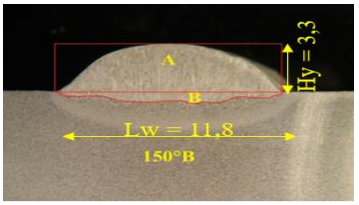
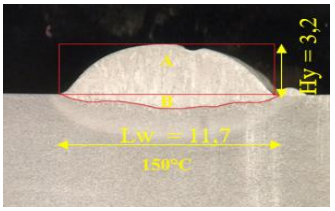
Quanto a formação excessiva de respingos nos ângulos de 60° e 90° pode ocorrer porque essas inclinações aproximam a tocha da posição perpendicular em relação à poça de fusão. A turbulência na transferência metálica, a posição de 90° (tocha totalmente reta) e os 60° (muito próxima da reta) podem promover uma força do arco elétrico que empurre o metal fundido diretamente para baixo. A turbulência na poça, provoca colisões mecânicas e a ejeção de gotas de metal para fora do cordão em forma de respingos. Em contrapartida, os ângulos mais inclinados (como 30° na técnica de empurrar, ou 120° e 150° na técnica de puxar) possibilitam

que a força do arco empurre os respingos e o metal fundido para trás ou para a frente de forma direcional, suavizando a transferência e reduzindo drasticamente as projeções (Andrade, 2007; Modenesi, P. J. et al.,2014; Sumig, 2026).

5.2 Dimensões das soldas

As macrografias das posições 1, 2 e 3 correspondentes a ¼", ½" e ¾" do comprimento foram selecionadas por desprezar os inícios e finais imediatos e dessa forma considerar as regiões mais estáveis dos cordões, cujo estão apresentadas na Fig.19.

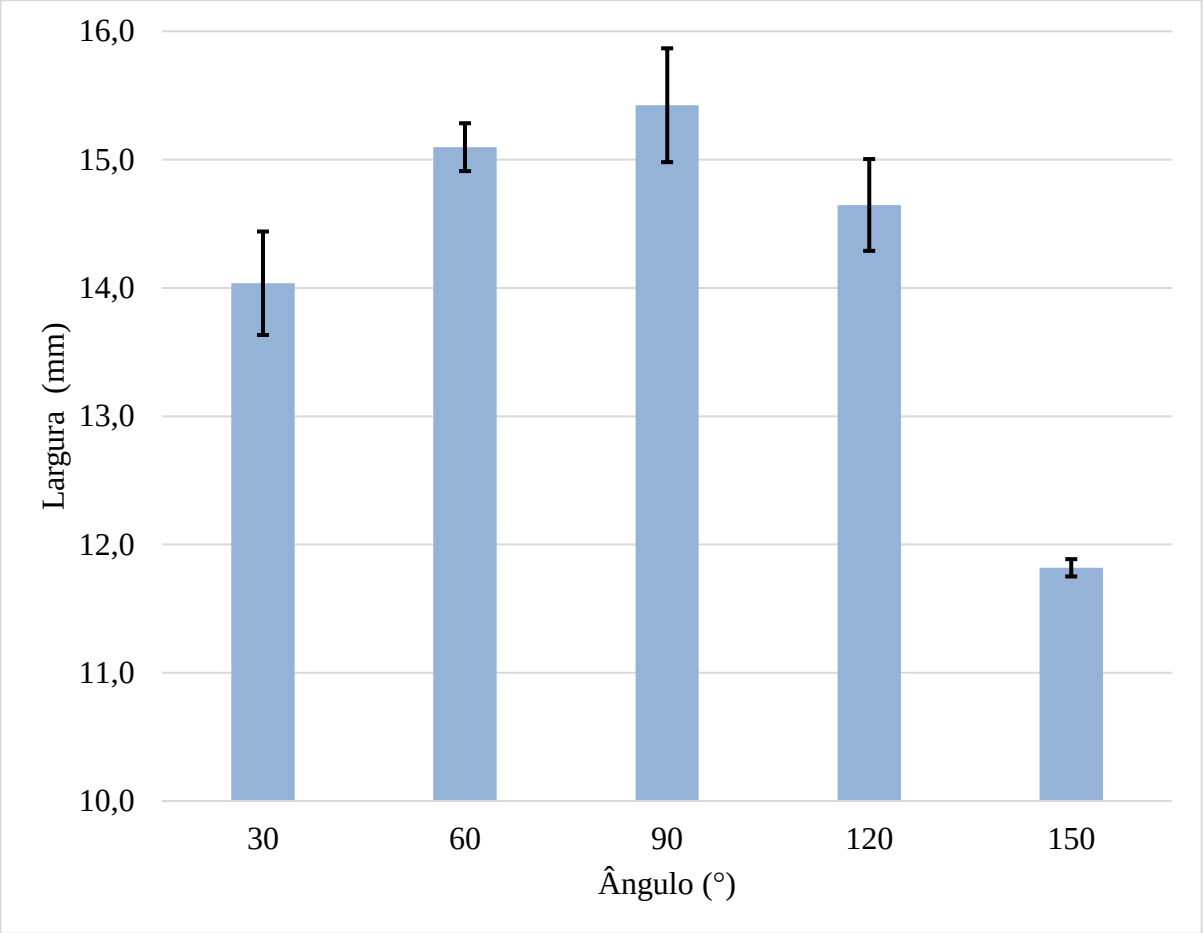
Figura 19 – Fotografias das seções transversais com cotas e regiões

(º)	Seção 1	Seção 2	Seção 3
30			
60			
90			
120			
150			

Fonte: Autoria própria, 2026.

Conforme observado nas Figs. 19 e 20, observa-se um aumento gradual da largura do cordão entre 30° e 90°, atingindo o valor máximo próximo de 15,42 mm. A partir desse ponto ocorre redução da largura para 120° e uma queda mais acentuada em 150°, alcançando aproximadamente 11,82 mm. Isso sugere que o ângulo de 90° promoveu uma distribuição mais uniforme da energia do arco sobre a superfície da chapa, favorecendo o espalhamento da poça de fusão. Em contrapartida, em 150° houve concentração da energia em uma região menor, reduzindo a molhabilidade e a dispersão lateral do metal depositado (Machado, 1996).

Figura 20 – Relação entre a largura média do cordão em função do ângulo de deposição

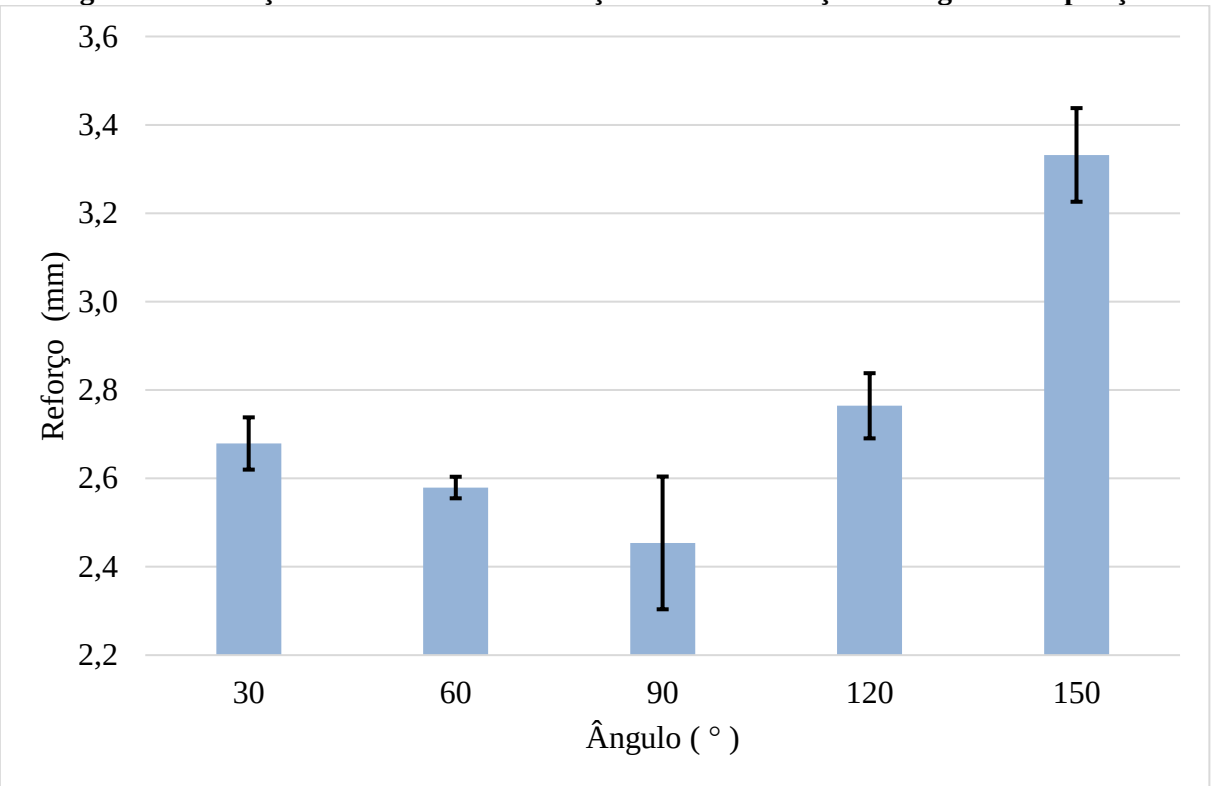


Fonte: Autoria própria, 2026.

Esse comportamento pode ser explicado pela forma como a energia do arco é distribuída sobre a superfície da chapa. Em 90°, o arco incide perpendicularmente ao metal de base, promovendo distribuição mais homogênea do calor e favorecendo o espalhamento lateral da poça de fusão. Quando o ângulo é aumentado para 120° e 150°, a energia passa a atuar de forma menos eficiente sobre a superfície, reduzindo a molhabilidade do metal líquido e limitando o espalhamento lateral da poça (Machado, 1996).

Observando-se as Figs.19 e 21, constata-se que o reforço apresentou comportamento oposto ao observado para a largura. O menor valor ocorreu em 90° com aproximadamente 2,45 mm, enquanto o maior foi obtido em 150° com aproximadamente 3,33 mm. Esse resultado demonstra que, quando a largura diminui, o mesmo volume de metal depositado tende a se concentrar verticalmente, aumentando a altura do cordão (Machado, 1996).

Figura 21 – Relação entre a altura do reforço médio e a variação do ângulo de deposição

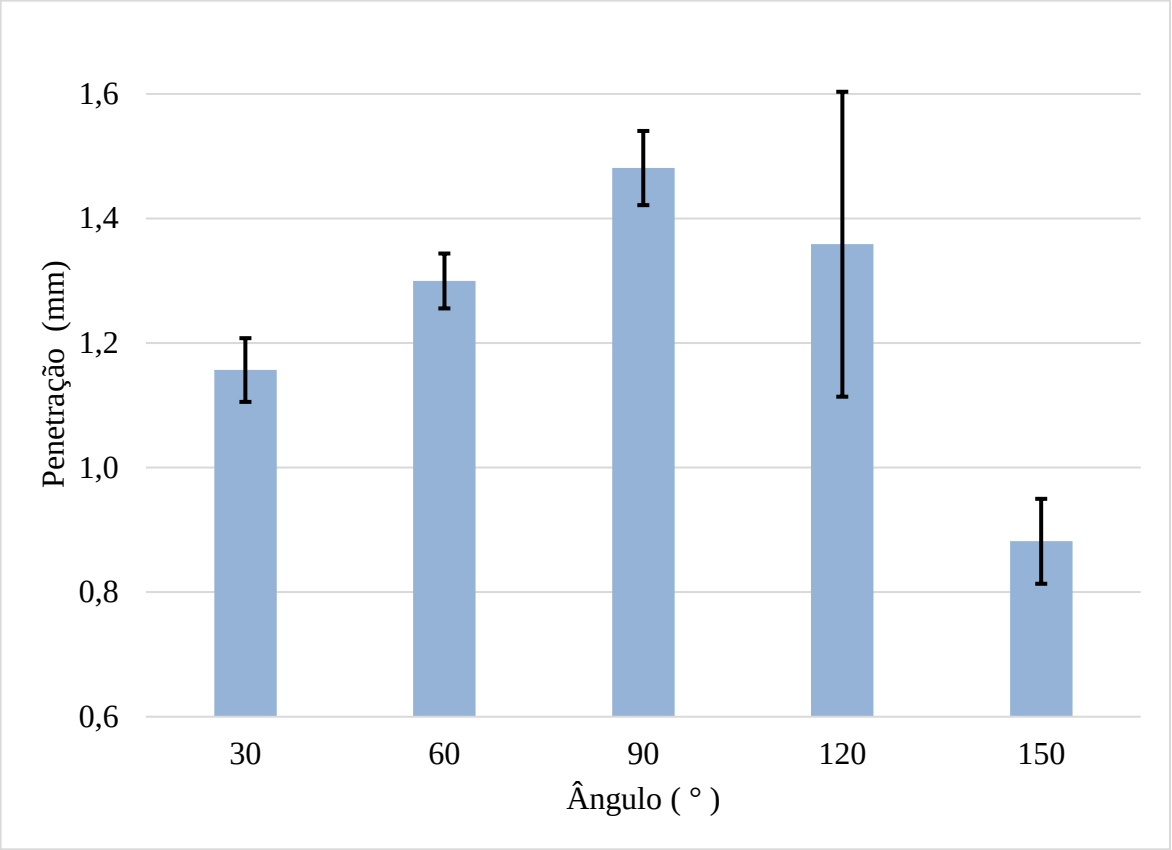


Fonte: Autoria própria, 2026.

O aumento do reforço observado para os maiores ângulos pode ser atribuído à redução da largura do cordão. Como a taxa de deposição permaneceu constante durante os ensaios, o menor espalhamento lateral da poça de fusão levou ao acúmulo de material na direção vertical, produzindo cordões mais convexos e com maior altura de reforço (Machado, 1996).

A penetração (Fig. 22) apresentou comportamento semelhante ao observado para a largura dos cordões, com valores crescentes até o ângulo de 90° atingindo aproximadamente 1,48 mm, e redução para ângulos superiores, sendo de 0,88 mm para o ângulo de 150°. O resultado sugere que a incidência perpendicular do arco favoreceu maior transferência de calor para o metal de base, aumentando a profundidade de fusão (Andrade, 2007; Machado, 1996).

Figura 22 – Relação entre a penetração média e a variação do ângulo de deposição

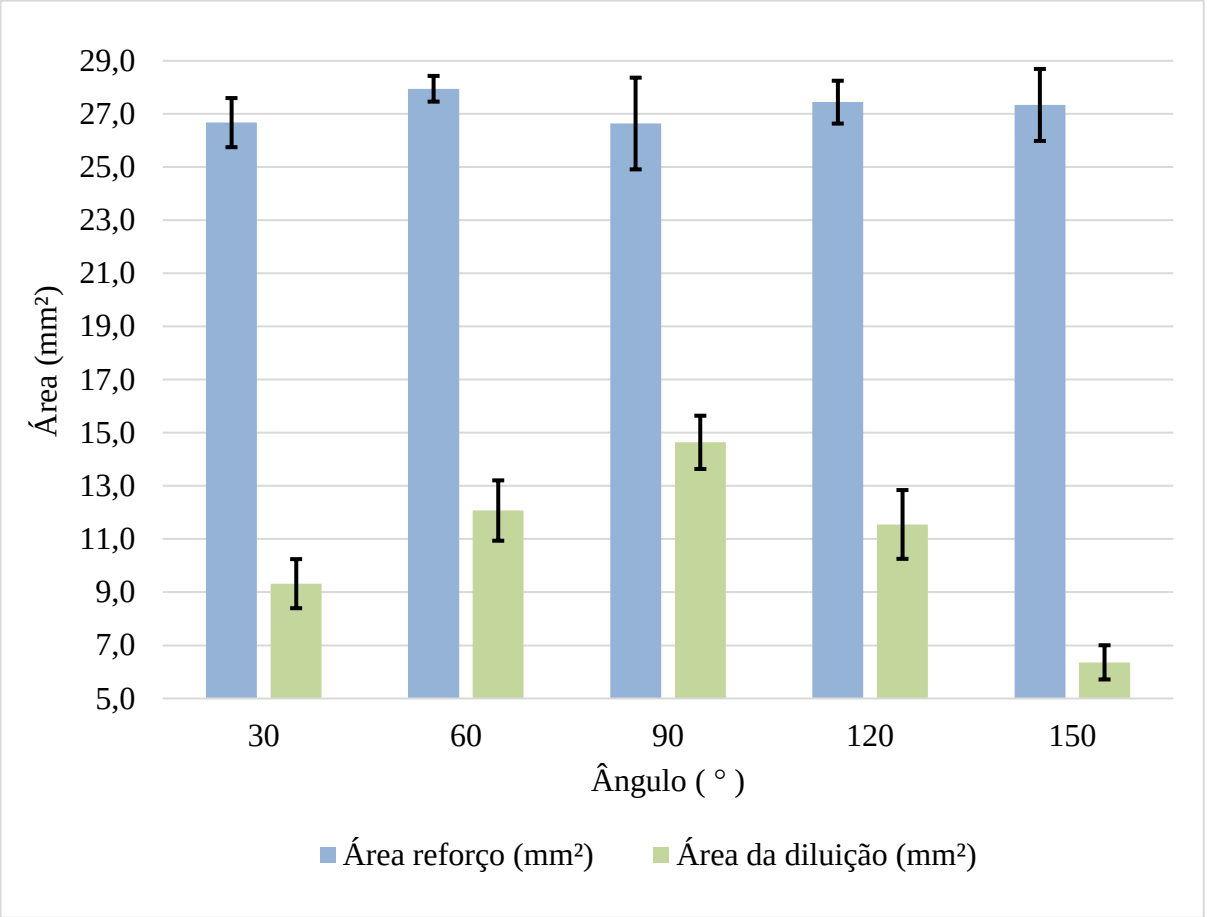


Fonte: Autoria própria, 2026.

Os maiores valores de penetração foram observados para o ângulo de 90°, indicando maior eficiência na transferência de calor para o metal de base. A incidência perpendicular do arco pode favorecer o aumento da densidade de energia na interface metal de base/metal depositado, promovendo maior profundidade de fusão. Para ângulos mais elevados observou-se redução da penetração, resultado associado à menor eficiência da transferência térmica para o substrato (Andrade, 2007; Machado, 1996).

No gráfico da Fig. 23 são apresentadas as áreas do reforço e diluição em função do ângulo. Nota-se que a área de reforço permaneceu praticamente constante entre os diferentes ângulos, variando aproximadamente entre 26 e 28 mm². Isso indica que a taxa de deposição foi mantida constante, o que era esperado, pois a velocidade de alimentação do arame (WFS de 7,01 m/min) não foi alterada. A área diluída aumentou de aproximadamente 9,32 mm² para cerca de 14,64 mm² entre 30° e 90°, reduzindo posteriormente até cerca de 6,36 mm² em 150°. Esse comportamento confirma a tendência observada na penetração (Machado, 1996).

Figura 23 - Relação entre a área e diluição com a variação do ângulo de ataque



Fonte: Autoria própria, 2026.

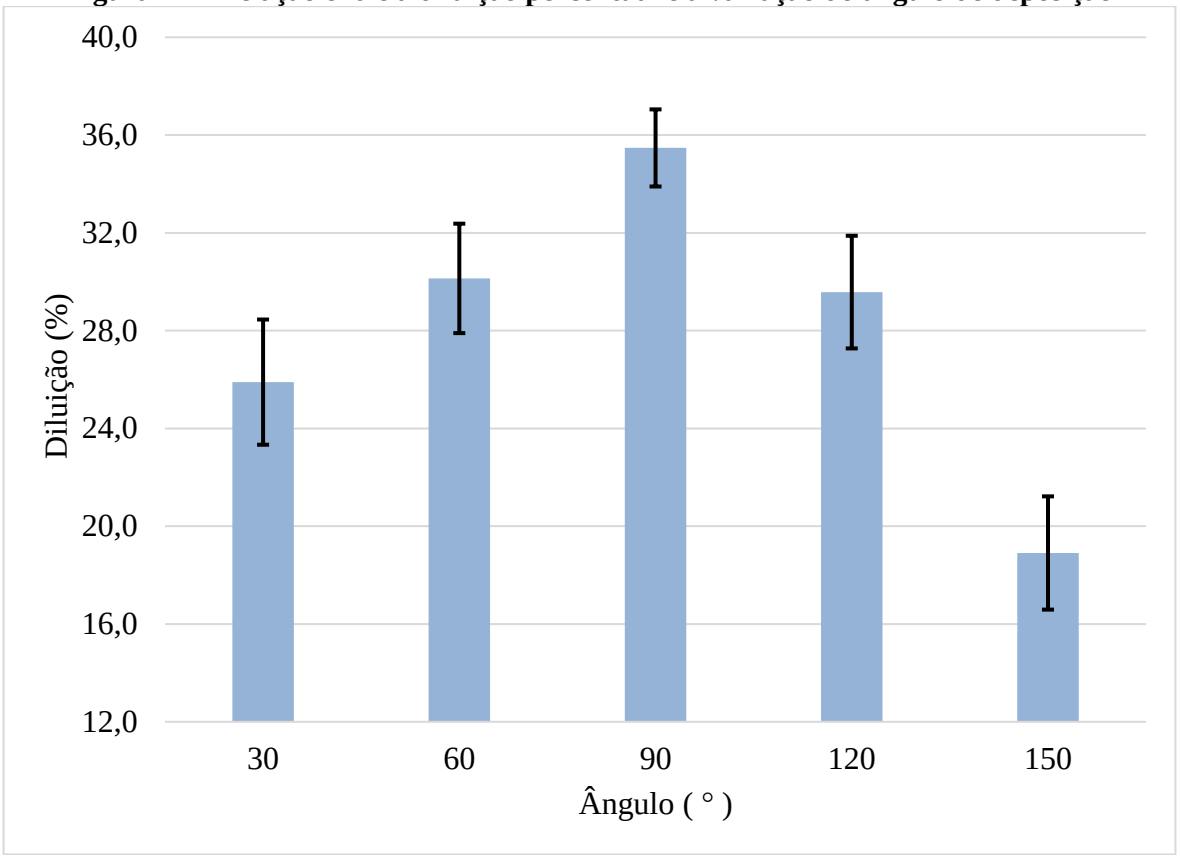
A reduzida variação da área de reforço indica que o volume de metal depositado permaneceu praticamente constante durante todos os ensaios, evidenciando estabilidade da taxa de deposição. Dessa forma, as alterações observadas na geometria dos cordões podem ser atribuídas predominantemente à influência do ângulo de deposição sobre a distribuição térmica e sobre a dinâmica da poça de fusão (Lippold, 2015; Machado, 1996; Starling et al.,2011).

A evolução da área de diluição acompanhou a tendência observada para a penetração, indicando que a condição de 90° promoveu maior fusão do metal de base. Esse comportamento evidencia que a orientação da tocha exerce influência direta sobre a quantidade de energia efetivamente transferida ao substrato (Lippold, 2015; Machado, 1996; Starling et al.,2011).

Pela Fig. 24, observa-se que a diluição aumentou progressivamente até o ângulo de 90°, atingindo aproximadamente 35%, e diminuiu para valores inferiores a 20% em 150°. Esse resultado evidencia que a orientação perpendicular da tocha proporcionou maior transferência

de energia ao substrato, favorecendo a fusão do metal de base e aumentando a participação deste na composição final do cordão (Lippold, 2015; Machado, 1996; Starling et al.,2011).

Figura 24 – Relação entre a diluição percentual e a variação do ângulo de deposição



Fonte: Autoria própria, 2026.

A diluição apresentou comportamento diretamente relacionado à penetração e à área fundida do metal de base. O valor máximo foi obtido para o ângulo de 90°, evidenciando maior incorporação do metal de base ao metal depositado. Em contraste, o ângulo de 150° resultou na menor diluição, indicando redução significativa da fusão do substrato e predominância do metal de adição na composição final do cordão (Lippold, 2015; Machado, 1996; Starling et al.,2011).

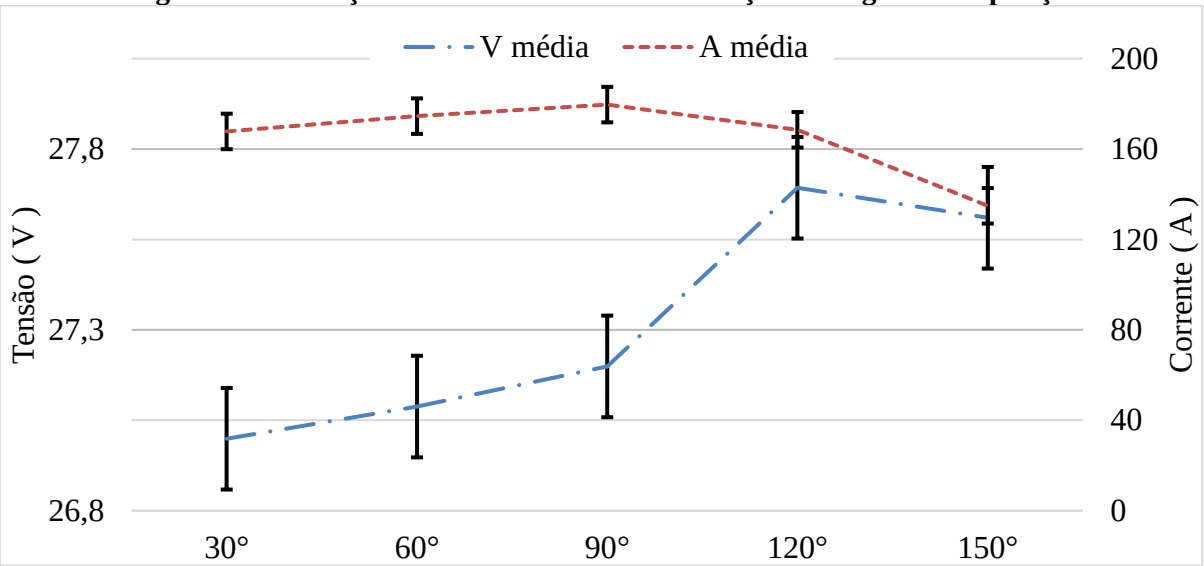
A análise conjunta dos parâmetros geométricos demonstra que o ângulo de deposição pode ter exercido influência significativa sobre a formação dos cordões FCAW. O ângulo de 90° apresentou os maiores valores de largura, penetração, área diluída e diluição percentual, indicando maior eficiência de transferência térmica para o metal de base. Em contrapartida, o ângulo de 150° produziu cordões mais estreitos, com maior reforço e menor diluição, evidenciando menor fusão do substrato e maior concentração do metal depositado sobre a superfície (Lippold, 2015; Machado, 1996; Starling et al.,2011).

De forma geral, os resultados sugerem que a condição de 90° representa a configuração mais favorável quando o objetivo é maximizar a fusão e a diluição, enquanto ângulos elevados, como 150°, tendem a produzir depósitos mais convexos, com menor penetração e menor interação metalúrgica com o metal de base. Esses resultados corroboram a literatura, que aponta a orientação da tocha como um dos fatores responsáveis pela distribuição da energia do arco, pela dinâmica da poça de fusão e, consequentemente, pela geometria final da solda (Lippold, 2015; Machado, 1996; Starling et al.,2011).

5.3 Análise dos sinais elétricos

Os valores médios de tensão, corrente, potência aparente (V×A) e aporte térmico obtidos para os diferentes ângulos de ataque que permitiram avaliar a influência dessa variável sobre o comportamento elétrico do processo FCAW. Observando-se a Fig. 25, a tensão média apresentou pequena variação entre as condições avaliadas, permanecendo próxima de 27 V, então observa-se que a geometria dos cordões não foi influenciada significativamente pela tensão do arco. Em contrapartida, a corrente média apresentou aumento progressivo entre os ângulos de 30° e 90°, seguido por redução para os ângulos de 120° e 150° (Starling; Modenesi; Borba, 2010; Bauné; Bonnet; Liu, 2001).

Figura 25 - Variação da tensão e corrente em função do ângulo de deposição



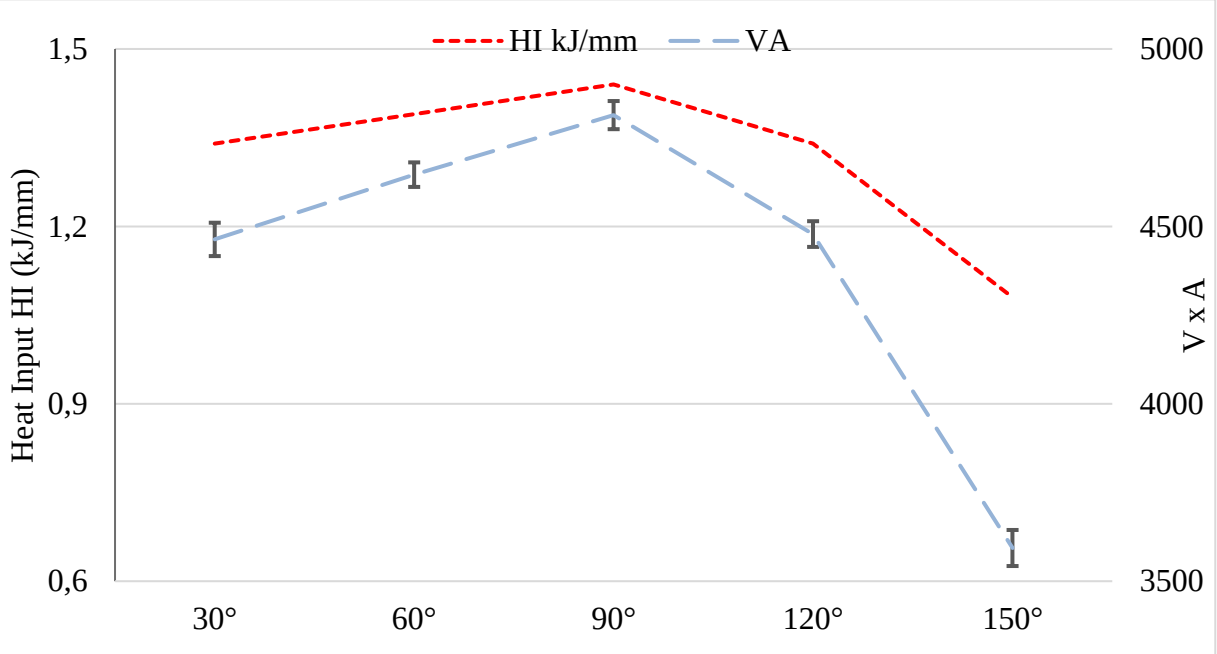
Fonte: Autoria própria, 2026.

O maior valor de corrente média foi observado no ângulo de 90°, atingindo aproximadamente 180 A, enquanto o menor valor foi registrado para o ângulo de 150°, com

cerca de 135 A. Esse comportamento pode ser associado à influência do ângulo de ataque sobre o comprimento efetivo do arco, a estabilidade da transferência metálica e a dinâmica da poça de fusão. Na condição de 90°, o arco apresentou condições mais favoráveis à transferência metálica, resultando em maior corrente média e maior eficiência na transferência de energia para a peça. Por outro lado, no ângulo de 150°, a inclinação da tocha pode ter contribuído para o aumento da instabilidade do arco, reduzindo a corrente efetiva e, consequentemente, a potência transferida ao metal base (Starling; Modenesi; Borba, 2010; Bauné; Bonnet; Liu, 2001).

A potência aparente Fig. 26 apresentou comportamento semelhante ao observado para a corrente média, alcançando seu valor máximo no ângulo de 90°, com aproximadamente 4814 VA. Considerando a relação entre tensão e corrente, esse resultado demonstra que o aumento da corrente foi o principal responsável pela elevação da potência elétrica do processo. Em contrapartida, o ângulo de 150° apresentou o menor valor de potência aparente, refletindo a redução da corrente observada nessa condição. Desta forma, implica-se que a ângulo pode ter influenciado diretamente a potência do arco, uma vez que o ângulo de 90° produziu a maior potência elétrica e o ângulo de 150° produziu a menor potência, o que correlacionado aos demais resultados, explica quase todos os resultados geométricos observados (Starling; Modenesi; Borba, 2010; Bauné; Bonnet; Liu, 2001).

Figura 26 - Variação da potencia aparente e aporte térmico em função do ângulo



Fonte: Autoria própria, 2026.

O aporte térmico acompanhou a mesma tendência verificada para a potência aparente. O maior valor foi obtido para o ângulo de 90°, correspondendo a aproximadamente 1,44 kJ/mm, indicando maior transferência de energia e maior fusão do substrato para o metal base. Conforme apresentado no item 5.2, essa condição também resultou na maior penetração e na maior área fundida entre os ângulos avaliados, evidenciando a influência direta do aporte térmico sobre a geometria do cordão. Para os ângulos de 30° e 60°, foram observados valores intermediários de aporte térmico, compatíveis com os resultados de penetração intermediária obtidos nas análises macrográficas (Starling; Modenesi; Borba, 2010; Bauné; Bonnet; Liu, 2001).

No ângulo de 120°, observou-se uma redução moderada do aporte térmico em relação à condição de 90°, acompanhada pela diminuição da energia transferida ao metal base. Essa tendência também foi observada nos resultados geométricos, que apresentaram redução da penetração e da área fundida. Já o ângulo de 150° apresentou o menor aporte térmico do estudo, aproximadamente 1,08 kJ/mm, resultado compatível com a menor penetração, menor diluição e menor área fundida observadas no item 5.2 (Starling; Modenesi; Borba, 2010; Bauné; Bonnet; Liu, 2001).

Esses resultados indicam que a variação do ângulo de ataque influencia diretamente a transferência de energia durante a soldagem, refletindo nas características geométricas do cordão e na eficiência do processo. Então, observa-se a seguinte correlação em que o maior aporte térmico proporciona uma maior largura do cordão, e consequentemente, em condições de maior energia disponível têm-se um maior volume de metal fundido com maior espalhamento da poça (Starling; Modenesi; Borba, 2010; Bauné; Bonnet; Liu, 2001).

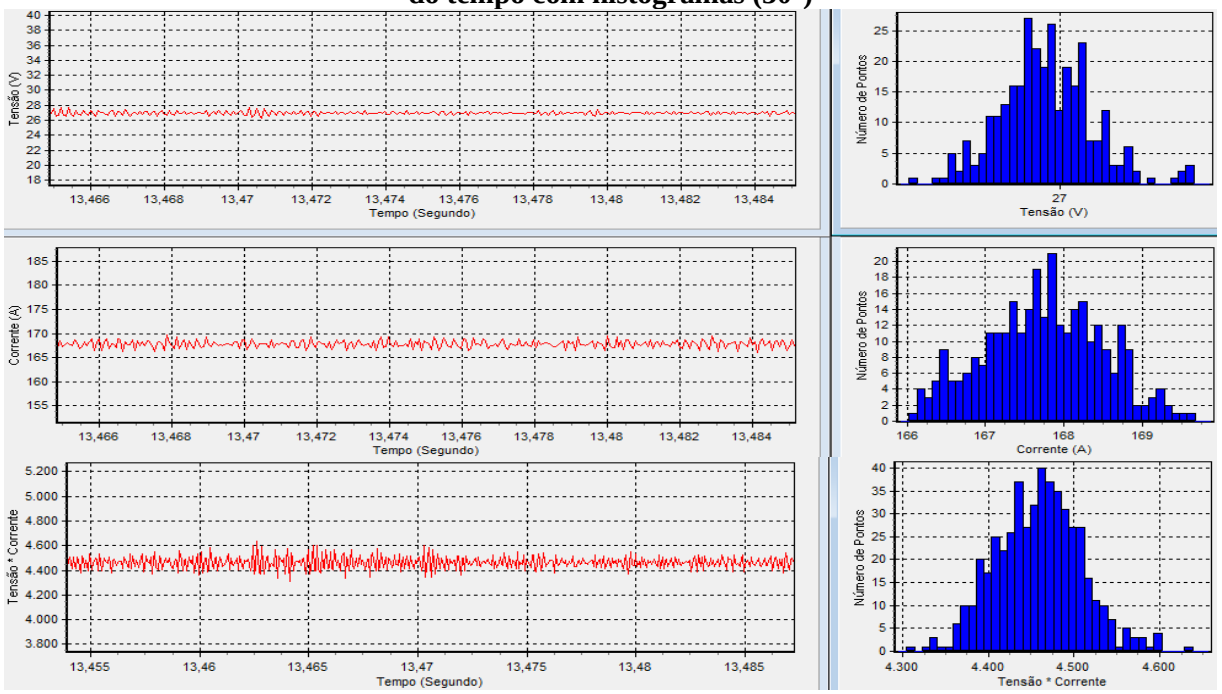
Os desvios padrões obtidos para tensão, corrente e potência foram avaliadas em todas as condições, variando entre 0,12 e 0,27 V para a tensão, entre 0,71 e 1,13 A para a corrente e entre aproximadamente 33 e 52 VA para a potência aparente. Esses resultados indicam redução da dispersão dos sinais elétricos durante a soldagem, evidenciando estabilidade operacional e consistência dos dados adquiridos (Starling; Modenesi; Borba, 2010; Bauné; Bonnet; Liu, 2001).

Adicionalmente, a comparação entre os valores médios calculados para os diferentes intervalos de análise demonstrou elevada concordância entre os resultados obtidos. As diferenças observadas entre os intervalos foram mínimas, indicando que o processo atingiu regime permanente durante a aquisição dos sinais. Dessa forma, os valores médios apresentados podem ser considerados representativos no comportamento elétrico de cada condição experimental avaliada (Starling; Modenesi; Borba, 2010; Bauné; Bonnet; Liu, 2001).

A análise dos oscilogramas de tensão, corrente e potência elétrica instantânea evidenciou que o processo FCAW apresentou estabilidade durante o intervalo avaliado, sem ocorrência de interrupções bruscas do arco ou variações excessivas dos sinais elétricos Figs. 27 a 31. A tensão média permaneceu em faixa relativamente estreita para todos os ângulos, indicando que essa variável teve menor tendência nas alterações geométricas observadas nos cordões. Em contrapartida, a corrente média apresentou variação mais expressiva, aumentando progressivamente de 30° até 90° e reduzindo-se nos ângulos de 120° e 150° (Starling; Modenesi; Borba, 2010; Bauné; Bonnet; Liu, 2001).

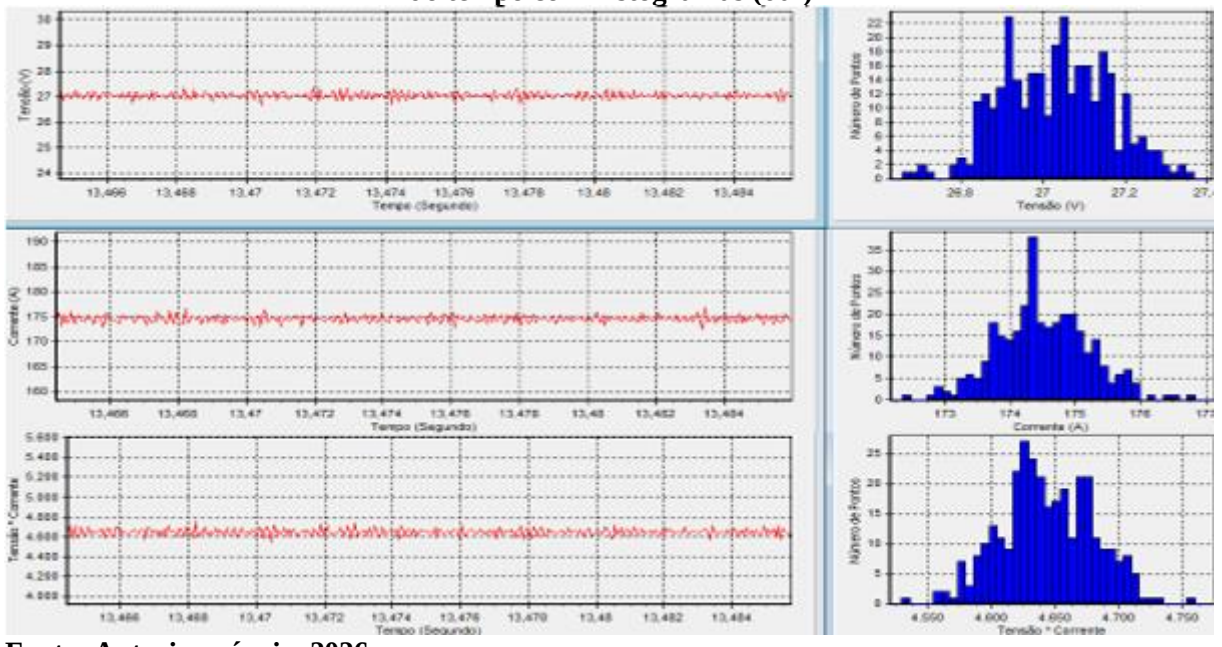
O maior valor de corrente média obtido para o ângulo de 90° resultou também no maior produto tensão-corrente e, consequentemente, no maior aporte térmico calculado. Essa condição favoreceu maior transferência de energia para o metal de base, justificando os maiores valores de largura, penetração, área diluída e diluição percentual observados anteriormente. Dessa forma, a incidência mais perpendicular do arco contribuiu para maior eficiência de fusão e melhor acoplamento térmico entre o arco elétrico e o substrato (Staling; Modensi; Borba, 2010; Bauné; Bonnet; Liu, 2001).

Figura 27 - Oscilogramas das variações da tensão, corrente e da multiplicação V x A em função do tempo com histogramas (30°)



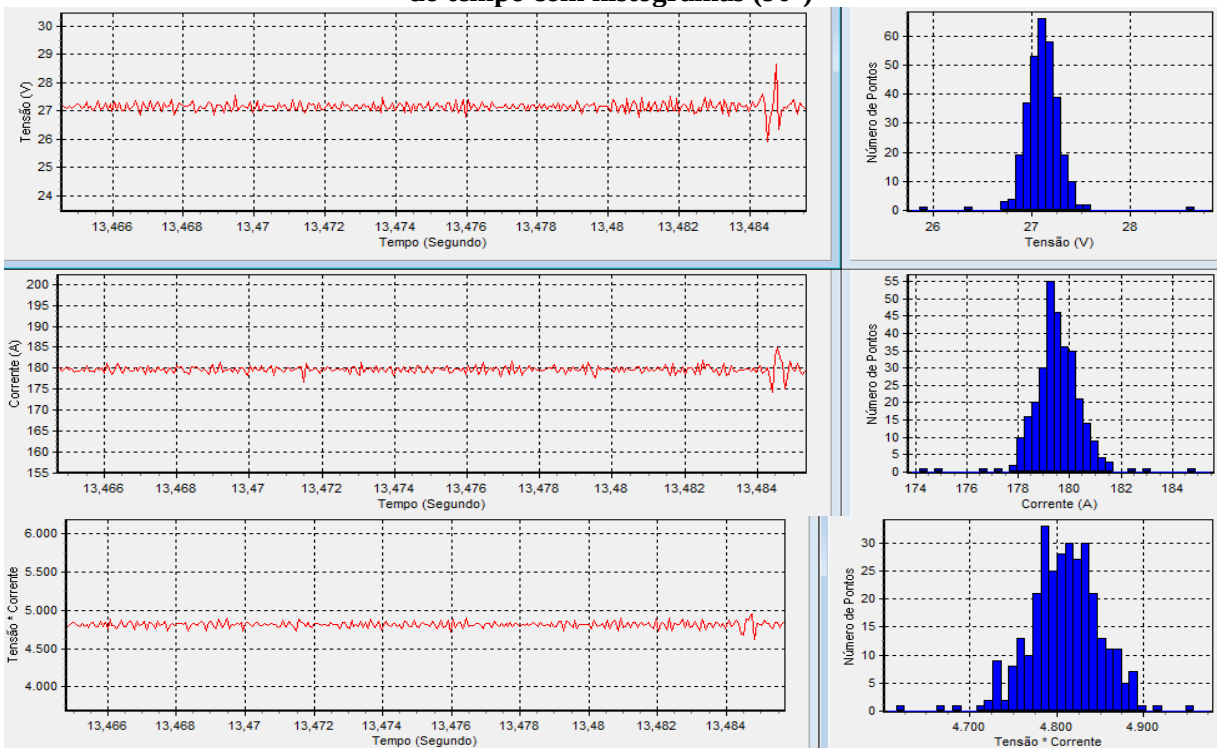
Fonte: Autoria própria, 2026.

Figura 28 – Oscilogramas das variações da tensão, corrente e da multiplicação V x A em função do tempo com histogramas (60°)



Fonte: Autoria própria, 2026.

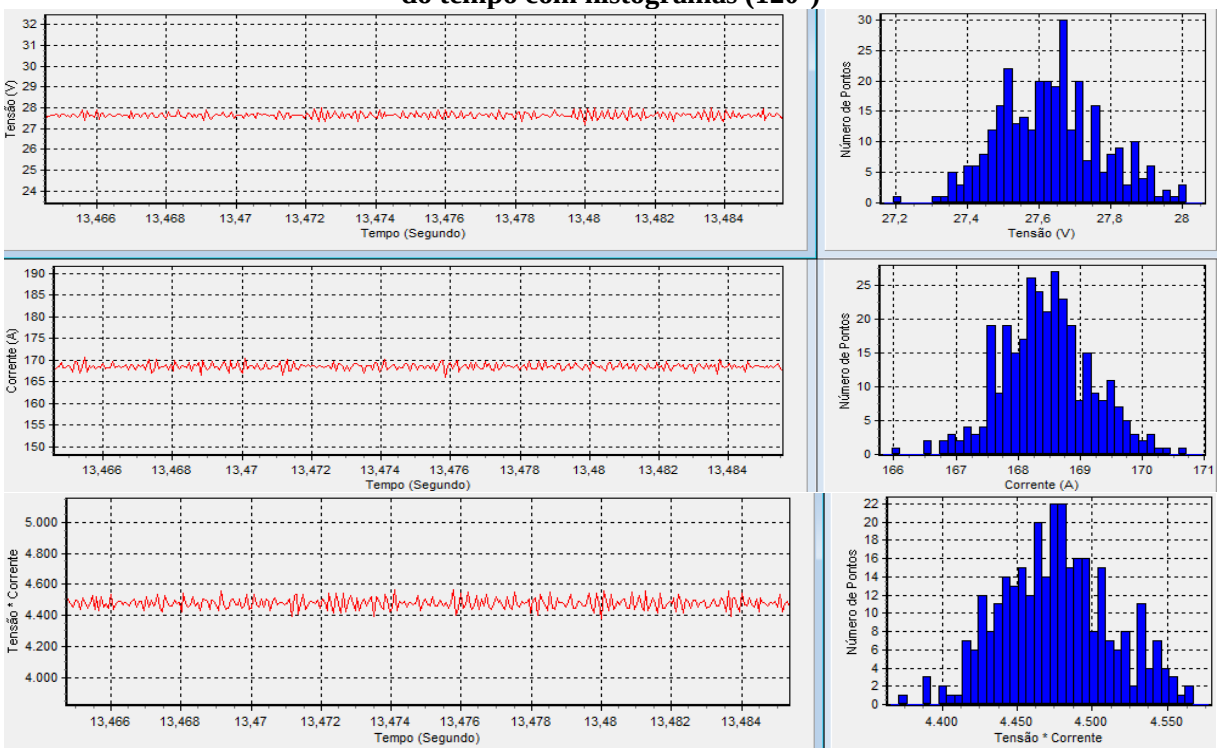
Figura 29 – Oscilogramas das variações da tensão, corrente e da multiplicação V x A em função do tempo com histogramas (90°)



Fonte: Autoria própria, 2026.

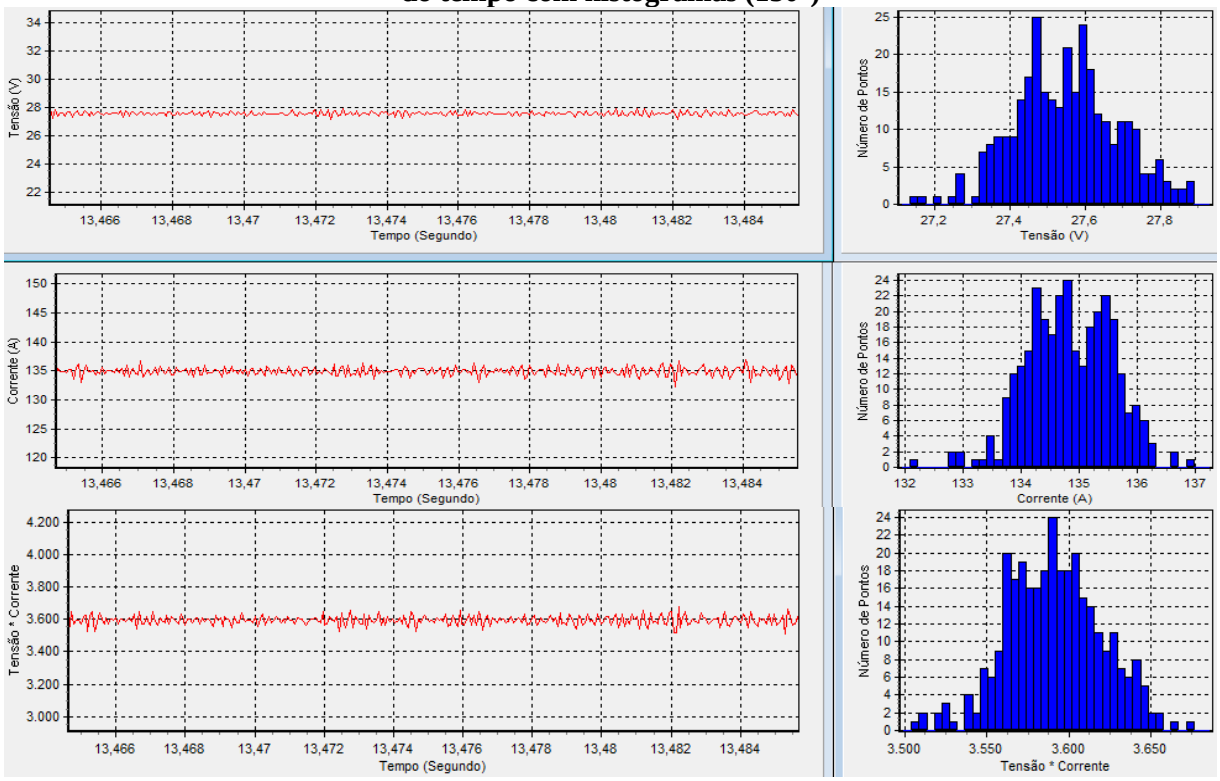
Para o ângulo de 150°, observou-se redução significativa da corrente média, do produto V×A e do aporte térmico. Esse comportamento indica menor energia efetiva disponível para fusão do metal de base, o que explica a menor penetração, menor largura e menor diluição obtidas nessa condição. Como a velocidade de alimentação do arame e a velocidade de soldagem foram mantidas constantes, a redução do espalhamento lateral e da fusão do substrato favoreceu o acúmulo do metal depositado na direção vertical, resultando no maior reforço médio entre os cordões avaliados (Starling; Modenesi; Borba, 2010; Bauné; Bonnet; Liu, 2001).

Figura 30 - Oscilogramas das variações da tensão, corrente e da multiplicação V x A em função do tempo com histogramas (120°)



Fonte: Autoria própria, 2026.

Figura 31 – Oscilogramas das variações da tensão, corrente e da multiplicação V x A em função do tempo com histogramas (150°)



Fonte: Autoria própria, 2026.

Portanto, os resultados demonstram que a variação do ângulo de deposição não afetou apenas a geometria final dos cordões, mas também modificou o comportamento elétrico efetivo do processo. O modo de transferência possivelmente observado nesse experimento foi o modo híbrido (globular e spray) determinado pela transferência axial de gotas de pequeno porte, com elevada frequência de projeção do fundido e regularidade na estabilidade térmica. Esse comportamento é apontado para arames tubulares rutílicos E71T-1-C1A2-CS2, dos quais relacionam essa condição a diminuição de respingos e a estabilidade do arco elétrico. Nesse estudo, a condição de 90° apresentou maior estabilidade energética e maior capacidade de fusão, enquanto o ângulo de 150° reduziu a energia transferida ao substrato, produzindo cordão mais estreito, mais convexo e com menor diluição térmica (Bauné et al. , 2001; Starling et al., 2010).

6 CONCLUSÕES

O aumento da largura dos cordões até o ângulo de 90° pode ser associado ao aumento simultâneo da corrente média, da potência elétrica e do aporte térmico. Nessas condições, o maior volume de energia transferido para a peça pode ter promovido o aumento da área fundida e maior espalhamento lateral da poça de fusão. Em contrapartida, a redução do aporte térmico observada em 150° limitou o espalhamento do metal líquido, resultando em cordões mais estreitos, menor área de diluição e menor altura de reforço.

A penetração apresentou forte dependência do aporte térmico imposto ao sistema. O maior valor obtido para o ângulo de 90° coincide com o maior produto tensão-corrente e com o maior aporte térmico calculado. Tal comportamento evidencia que o aumento da energia transferida ao substrato pode ter favorecido a fusão do metal de base e, consequentemente, o aumento da profundidade de penetração.

A diluição acompanhou a tendência observada para a penetração e para o aporte térmico. O aumento do aporte térmico até o ângulo de 90° elevou a quantidade de metal de base fundido, aumentando a participação deste na composição final do cordão. Já em 150° ocorreu redução significativa da diluição devido à menor energia transferida ao substrato.

A variação do ângulo de deposição modificou não apenas a geometria final dos cordões, mas também os parâmetros elétricos efetivos do processo. O ângulo de 90° promoveu aumento da corrente média, da potência elétrica e do aporte térmico, resultando nos maiores valores de largura, penetração e diluição. Em contrapartida, o ângulo de 150° reduziu significativamente a corrente média e o aporte térmico, produzindo cordões mais estreitos, menor penetração e menor diluição. Esses resultados sugerem que a orientação da tocha pode ter influenciado a eficiência de transferência de energia do arco elétrico para o metal de base, afetando simultaneamente o comportamento metalúrgico e geométrico da solda.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudar mais detalhadamente a transferência metálica, com recursos de filmagem em alta velocidade e análises estatísticas para validação dos modos de transferência;

Realizar estudos com mais amostras e com mais variações de gases consumíveis para compreender e compara os efeitos das misturas gasosas nos modos de transferência metálica em processos FCAW;

Realizar estudos com mais varições dos ângulos estudados, ou seja, com os ângulos (15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165)° de forma a compreender detalhadamente os efeitos da deposição com distintas variações angulares.

Analisar os desvios padrões para as condições que tiveram maior divergência entre os aportes.

REFERÊNCIAS

AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS). AWS A5.20/A5.20M:2021*:* **Specification for Carbon Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding.** 6. ed. Miami: AWS, 2021.

AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS). AWS A5.36/A5.36M:2016 – **Specification for Carbon and Low-Alloy Steel Flux Cored Electrodes for Flux Cored Arc Welding and Metal Cored Electrodes for Gas Metal Arc Welding**. 2. ed. Miami, FL: AWS, 2016.

AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS). ***Welding Handbook: Welding Processes*.** 9. ed. Miami: AWS, 2004.

ANDRADE, S. T. **Mapeamento do processo mecanizado FCAW sob proteção gasosa com backing.** Dissertação (Mestrado) – UFMG, Belo Horizonte, 2007.

AZEVEDO, S. C.; RESENDE, A. A. Effect of angle, distance between electrodes and TIG current on the weld bead geometry in TIG-MIG/MAG welding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 114, n. 9-10, p. 3157-3172, 2021.

BAUNÉ, E.; BONNET, C.; LIU, S. **Assessing metal transfer stability and spatter severity in flux cored arc welding.** *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 6, n. 3, p. 139–148, 2001.

CARY, H. B.; HELZER, S. C. ***Modern Welding Technology*. 6**. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005.

CORREIA, E. C**. Analysis and optimization of the TIG-MIG/MAG process variables on the welding bead geometry parameters.** Universidade Federal de Goiás, 2021.

DARWISH, A.; ERICSON, S.; GHASEMI, R.; et al. Investigating the Ability of Deep Learning to Predict Welding Depth and Pore Volume in Hairpin Welding. 2023.
ESAB BRASIL. ***OK Tubrod 71 Ultra: Arame tubular rutílico para aços carbono.*** ESAB Brasil, 2023.

ESAB BRASIL. **OK Tubrod 71: Arames tubulares para aço carbono.** Contagem: ESAB, 2026. Disponível em: https://esab.com/br/sam_pt/products-solutions/fillermetalspdf/?filename=ersmlejV0P1m3AI&siteid=sam_pt&countryname=BRA&coutrylocale=pt-br. Acesso em: 25 maio 2026.

GOPALUNI, R. B.; TULSYAN, A.; CHACHUAT, B.; et al. **Modern Machine Learning Tools for Monitoring and Control of Industrial Processes: A Survey. *Computers & Chemical Engineering***, 2022.

KOU, S. ***Welding Metallurgy*.** 3. ed. Hoboken: Wiley, 2020.

LIMA, Alexandre. **Como Escolher o Arame Tubular Adequado**. Alusolda Brasil, 10 fev. 2022. Disponível em: https://alusolda.com.br/como-escolher-o-arame-tubular-adequado/. Acesso em: 25 maio 2026.

LINCOLN ELECTRIC. **Gas Marks on FCAW Process Welds**. Cleveland: Lincoln Electric Global Corporation, c2026. Disponível em: https://www.lincolnelectric.com/en/welding-and-cutting-resource-center/weld-solutions/gas-marks-on-fcaw-process-welds. Acesso em: 2 jun. 2026.

LIPPOLD, J. C. **Welding Metallurgy and Weldability.** Hoboken: Wiley, 2015.

MACHADO, I. G. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos.** Porto Alegre, 1996.

MARCOS. ***GMAW vs FCAW – What is the main difference between both*. Senlisweld, 5 fev. 2025.** Disponível em: https://www.senlisweld.com/pt/gmaw-vs-fcaw/. Acesso em: 02 jun. 2026.

Modenesi, P. J., Bracarense, A. Q., (2007). **Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais.** Belo Horizonte – MG, 146p.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. ***Soldagem: fundamentos e tecnologia.*** 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2017.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Tecnologia da Soldagem**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. ***Introdução à metalurgia da soldagem.*** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG, 2012.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: Melhor Entendimento, Melhor Desempenho.** 2. ed. São Paulo: Artliber, 2008. 287 p. ISBN 9788588098428.

SUMIG. **Sumig Dicas: qual a diferença da solda com CO2 puro e mistura?** Caxias do Sul: Sumig Eficiência em Solda e Corte, c2026. Disponível em: https://www.sumig.com/pt/blog/post/sumig-dicas-diferenca-solda-com-co2-puro-e-mistura. Acesso em: 2 jun. 2026.

STARLING, C. M. D.; MODENESI, P. J.; BORBA, T. M. D. **Comparison of operational performance and bead characteristics when welding with different tubular wires.** *Welding International*, v. 24, n. 8, p. 579–592, 2010. DOI: 10.1080/09507110903568810.

STARLING, Cícero Murta Diniz; MODENESI, Paulo José; BORBA, Tadeu Messias Donizete. **Caracterização do Cordão na Soldagem FCAW com um Arame Tubular "Metal Cored".** Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 16, n. 3, p. 285-300, jul./set. 2011.

TIAN, B.; LU, K.-C.; ESLAMINIA, A.; et al**.** WeldMon: **A Cost-effective Ultrasonic Welding Machine Condition Monitoring System**. 2023.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. ***Soldagem: Processos e Metalurgia*.** 3. ed. São Paulo: Blucher, 2018.

ANEXOS

ANEXO A

Intervalo	2-28s						
Variável	V média	Dp	A média	Dp	VA	Dp	HI kJ/mm
30°	26,949	0,22	167,80	0,76	4463,30	47,04	1,34
60°	27,038	0,13	174,57	0,75	4645,80	34,58	1,39
90°	27,149	0,17	179,66	0,84	4813,60	39,66	1,44
120°	27,643	0,15	168,52	0,79	4478,40	36,22	1,34
150°	27,560	0,27	134,89	1,13	3593,60	50,79	1,08

ANEXO B

Intervalo	13,45-13,50s						
Variável	V média	Dp	A média	Dp	VA	Dp	HI kJ/mm
30°	26,949	0,23	167,80	0,76	4463,30	51,670	1,34
60°	27,038	0,12	174,57	0,71	4645,80	33,103	1,39
90°	27,149	0,15	179,66	0,88	4813,60	37,038	1,44
120°	27,643	0,15	168,52	0,79	4478,40	37,441	1,34
150°	27,560	0,20	134,89	0,98	3593,60	32,596	1,08

ANEXO C

