



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LETÍCIA GRAZIELE SILVA RIBEIRO

**ESTUDO PRELIMINAR DO EFEITO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE
SOLDAGEM A PLASMA KEYHOLE NA GEOMETRIA DE CORDÕES DE SOLDA
PRODUZIDOS EM CHAPAS DE AÇO ABNT 304**

RUSSAS
2025

LETÍCIA GRAZIELE SILVA RIBEIRO

ESTUDO PRELIMINAR DO EFEITO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE
SOLDAGEM A PLASMA KEYHOLE NA GEOMETRIA DE CORDÕES DE SOLDA
PRODUZIDOS EM CHAPAS DE AÇO ABNT 304

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, como requisito parcial à obtenção do título de bacharela em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro

Coorientador: Prof. Dr. Hélio Cordeiro de Miranda.

RUSSAS

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R369e Ribeiro, Leticia Graziele Silva Ribeiro.

Estudo preliminar do efeito dos parâmetros do processo de soldagem a plasma keyhole na geometria de cordões de solda produzidos em chapas de aço ABNT 304 / Leticia Graziele Silva Ribeiro Ribeiro. – 2025.
110 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas,
Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro.

Coorientação: Prof. Dr. Hélio Cordeiro de Miranda.

1. Soldagem a plasma. 2. Keyhole. 3. Geometria do cordão. 4. Parâmetros de soldagem. I. Título.

CDD 620.1

LETÍCIA GRAZIELE SILVA RIBEIRO

ESTUDO PRELIMINAR DO EFEITO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE
SOLDAGEM A PLASMA KEYHOLE NA GEOMETRIA DE CORDÕES DE SOLDA
PRODUZIDOS EM CHAPAS DE AÇO ABNT 304

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Programa de Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do Ceará,
Campus de Russas, como requisito parcial à
obtenção do título de bacharela em Engenharia
Mecânica.

Aprovada em: 13/03/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Edvan Cordeiro de Miranda
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. George Luiz Gomes de Oliveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Bosco e Ivancida, e aos meus
irmãos, Hilário e Eduardo.

Ao meu noivo, Anderson.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder o dom da vida e por permitir a construção deste trabalho, por permitir conhecer as pessoas que me fizeram chegar aqui e viver as oportunidades que Ele pôs em meu caminho. Agradeço, também, à Virgem Maria, pelo amparo e proteção.

Aos meus pais, João Bosco Ribeiro e Antônia Ivaneida da Silva, por me criar, apoiar e educar da melhor forma possível, muitas vezes abdicando de muitas coisas para oferecer o melhor para seus três filhos. Serei eternamente grata por darem o exemplo de ser humano incrível que são e por me ensinarem aquilo que não se aprende na escola, o amor, a dedicação e o cuidado.

Aos meus irmãos, Hilário e Eduardo, por toda a paciência, parceria, companheirismo, conselhos e amor. Vocês vieram antes de mim e fizeram meu caminho ser um pouco mais fácil e menos árduo. Incluo aqui também, minha irmã do coração, Elisabete, por todo apoio e conselhos que me deu e me dá.

Ao meu professor e orientador Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro, pela orientação neste trabalho, pelos ensinamentos dentro e fora da sala de aula, que além de um exímio professor, é uma pessoa maravilhosa e um verdadeiro cidadão. Agradeço, também, a todos os meus professores do ensino básico e da graduação, pois se cheguei até aqui, tem um pouco da tinta da caneta de vocês na escrita dessa história.

Ao Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem, pois além de ter desenvolvido este trabalho em suas dependências, teve um papel relevante no meu desenvolvimento pessoal e profissional. De modo especial, agradeço ao Prof. Dr. Hélio Cordeiro de Miranda, por conceder a oportunidade de fazer parte dessa equipe e pelo apoio durante todo esse trabalho.

Aos amigos e conselheiros, Rafaella Silva, Breno Rocha, Cleiton de Paula, Eric Fortunato, Karine Pereira e Adroaldo Moura. E aos colegas, Levi Dantas e Jenifer Sofia, pela ajuda com o preparo das amostras.

Aos amigos que fiz nesse período, em especial, ao Deyvison Maia, João Pedro, Enrickson, Cainã Ferreira, Anna Flávia, Yago Barbosa e Frederico Bertinni, vocês fizeram a rotina na universidade ser mais feliz e me enriqueceram com muitos ensinamentos, além de deixarem sempre lembranças positivas com cada um de vocês.

Por último e com todo amor, agradeço ao meu noivo, Anderson, por me acompanhar cada dia, por ser o melhor parceiro que eu poderia ter em minha vida, por dividir todos os

momentos comigo, alegrias, tristezas e conquistas. Por acreditar em mim e por afirmar isso todos os dias.

“Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível, e de repente você estará fazendo o impossível.” (São Francisco de Assis)

RESUMO

A busca por maior produtividade, redução de custos e melhoria da qualidade tem sido um dos principais desafios da indústria, incluindo a fabricação de produtos metálicos. Nesse contexto, avanços nos processos de soldagem desempenham um papel essencial, e tem impulsionado o desenvolvimento da soldagem a plasma. Dentre suas técnicas, destaca-se o modo *keyhole*, que permite penetração total em um único passe em chapas de média espessura. No entanto, a estabilidade do orifício formado no processo é fundamental para a qualidade e geometria dos cordões de solda, sendo diretamente influenciada pelos parâmetros de soldagem. Sabendo disto, este estudo tem por objetivo realizar um estudo preliminar dos efeitos dos parâmetros do processo de soldagem a plasma *keyhole* com alimentação de arame frio AWS A5.9 ER317L na geometria de cordões de solda em juntas de topo, usando como metal base o aço inoxidável ABNT. O estudo foi realizado em dois grupos de soldagem: o primeiro teve variação da energia de soldagem e velocidade de alimentação em três níveis, e o segundo, variou dois níveis de energia de soldagem e três de vazão do gás de plasma. Após análise da qualidade dos cordões e das macrografias, notou-se que os cordões de menor energia não foram uniformes, além de apresentarem poros e outros defeitos. Também foi possível observar a presença de mordeduras em todos os demais cordões, não sendo observada a presença de outros defeitos. Os resultados da análise ANOVA e do teste de Tukey indicaram que a energia de soldagem influenciou todas as medidas geométricas, exceto a diluição, sendo inversamente proporcional às medidas de reforço e diretamente proporcional às demais. A velocidade de alimentação teve influência significativa apenas da diluição. Já vazão do gás de plasma não teve interferência estatisticamente relevante, em nenhum dos parâmetros geométricos medidos. Embora alguns parâmetros de soldagem não apresentem diferenças estatísticas em determinadas medidas, foi possível observar algumas tendências nas médias apresentadas. Apesar da ausência de diferenças estatísticas em alguns casos, foram identificadas tendências, destacando a importância do controle dos parâmetros para otimização do processo.

Palavras-chave: soldagem a plasma; keyhole; geometria do cordão; parâmetros de soldagem.

ABSTRACT

The pursuit of higher productivity, cost reduction, and quality improvement has been one of the main challenges in the industry, including the manufacturing of metallic products. In this context, advancements in welding processes play an essential role and have driven the development of plasma welding. Among its techniques, the keyhole mode stands out, allowing full penetration in a single pass on medium-thickness plates. However, the stability of the keyhole formed during the process is crucial for the quality and geometry of the weld beads, being directly influenced by the welding parameters. Given this, the present study aims to conduct a preliminary investigation into the effects of keyhole plasma arc welding parameters, using cold wire feed AWS A5.9 ER317L, on the geometry of weld beads in butt joints, employing ABNT 304 stainless steel as the base metal. The study was conducted in two welding groups: the first varied the welding energy and wire feed speed at three levels, while the second varied welding energy at two levels and plasma gas flow rate at three levels. After analyzing the weld bead quality and macrographs, it was observed that lower-energy welds were not uniform and exhibited porosity and other defects. Additionally, undercutting was observed in all remaining welds, with no other defects detected. The results of the ANOVA analysis and Tukey test indicated that welding energy influenced all geometric measurements except dilution, being inversely proportional to reinforcement and directly proportional to the other parameters. Wire feed speed had a significant effect only on dilution, whereas plasma gas flow rate showed no statistically significant influence on any of the measured geometric parameters. Although some welding parameters did not present statistical differences in certain measurements, trends were observed in the mean values. Despite the lack of statistical differences in some cases, identified trends highlighted the importance of parameter control for process optimization.

Keywords: plasma arc welding; keyhole; weld bead geometry; welding parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Efeito da constrição do arco	19
Figura 2 – Fluxo dos gases no interior da tocha de soldagem.....	23
Figura 3 – Esquema elétrico para abertura do arco piloto	24
Figura 4 – Abertura do arco piloto e do arco principal.....	24
Figura 5 – Cordão de solda produzido pela técnica <i>melt-in</i>	26
Figura 6 – Tocha utilizada na soldagem microplasma.....	27
Figura 7 – Exemplo de junta produzida em chapa fina com a soldagem microplasma	27
Figura 8 – Orifício formado na soldagem <i>keyhole</i>	28
Figura 9 – Modo operacional <i>keyhole</i>	29
Figura 10 – Efeito da velocidade de soldagem na geometria do cordão	31
Figura 11 – Influência da vazão do gás de plasma na geometria do cordão	32
Figura 12 – Tipos de bocais de proteção	35
Figura 13 – Mudança no arco em função da afiação do eletrodo.....	36
Figura 14 – Porosidades	38
Figura 15 – Vazios	38
Figura 16 – Falta de penetração.....	39
Figura 17 – Humping.....	39
Figura 18 – Mordedura.....	40
Figura 19 – Trinca a quente	41
Figura 20 – Fluxograma com metodologia adotada	42
Figura 21 – Chapas de aço inoxidável ABNT 304	43
Figura 22 – Diagrama de Schaeffler.....	44
Figura 23 – Bobina de arame AWS A5.9 ER317L	45
Figura 24 – Bancada de soldagem.....	46
Figura 25 – Tocha de soldagem e sistema de movimentação, fonte de soldagem, alimentador de arame e refrigeração.....	47

Figura 26 – Alimentador acoplado à tocha de soldagem.....	47
Figura 27 – Sistema de aquisição de dados e cilindros de gás	48
Figura 28 – Placa para fixação da junta e purga de gás.....	49
Figura 29 – Regiões de análise	53
Figura 30 – Eletroerosão AgieCharmilles CUT E 600	54
Figura 31 – Junta após retirada de amostras.....	54
Figura 32 – Embutidora.....	55
Figura 33 – Politriz Struers LaboPol-25.....	55
Figura 34 – Amostra após finalização da preparação metalográfica.....	56
Figura 35 – Estereomicroscópio Zeiss Discovery.V20	57
Figura 36 – Medidas geométricas do cordão de solda.....	58
Figura 37 – Medidas de área	59
Figura 38 – Quadro com soldagens de teste autógenas	62
Figura 39 – Quadro de testes de soldagem com adição de material.....	65
Figura 40 – Quadro com cordões produzidos nas soldagens definitivas.....	67
Figura 41 – Quadro com macrografia das amostras	74
Figura 42 – Gráficos com a influência da energia de soldagem e velocidade de alimentação na largura dos cordões.....	78
Figura 43 – Gráficos com influência da energia de soldagem e velocidade de alimentação no reforço.....	81
Figura 44 – Gráficos com a influência da velocidade de alimentação e energia de soldagem na largura da raiz dos cordões	83
Figura 45 – Gráfico com a influência da velocidade de alimentação e energia de soldagem na profundidade da raiz dos cordões	86
Figura 46 – Gráficos com a influência da velocidade de alimentação e energia de soldagem na área da zona fundida dos cordões	88
Figura 47 – Gráfico com a influência da velocidade de alimentação e energia de soldagem na diluição	91
Figura 48 – Gráficos com a influência da vazão do gás de plasma e energia de soldagem na largura dos cordões.....	93

Figura 49 – Gráfico com a influência da vazão do gás de plasma e energia de soldagem no reforço dos cordões.....	96
Figura 50 – Gráfico com influência da vazão do gás de plasma e energia de soldagem na largura da raiz dos cordões	98
Figura 51 – Gráfico com a influência da energia de soldagem e vazão do gás de plasma na profundidade da raiz dos cordões	100
Figura 52 – Gráfico com a influência da vazão do gás de plasma e energia de soldagem na área da zona fundida dos cordões	103
Figura 53 – Gráfico com a influência da vazão do gás de plasma e energia de soldagem na diluição	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Defeitos na soldagem a plasma.....	37
Tabela 2 – Composição química do metal de base.....	43
Tabela 3 – Composição química do metal de adição.....	45
Tabela 4 – Condições de teste.....	50
Tabela 5 – Condições de soldagem variando energia de soldagem e velocidade de alimentação.....	51
Tabela 6 - Condições de soldagem variando energia de soldagem e vazão do gás de plasma.	51
Tabela 7- Parâmetros de soldagem constantes.	52
Tabela 8 – Largura dos cordões para análise variando energia de soldagem e velocidade de alimentação.....	77
Tabela 9 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da energia de soldagem na largura.....	79
Tabela 10 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da velocidade de alimentação na largura.....	79
Tabela 11 – Reforço dos cordões para análise variando energia de soldagem e velocidade de alimentação.....	80
Tabela 12 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência energia de soldagem no reforço.....	82
Tabela 13 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da velocidade de alimentação no reforço	82
Tabela 14 – Largura da raiz dos cordões para análise variando energia de soldagem e velocidade de alimentação.....	82
Tabela 15 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência energia de soldagem na largura da raiz.....	84
Tabela 16 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da velocidade de alimentação na largura da raiz	84
Tabela 17 – Profundidade da raiz dos cordões para análise variando energia de soldagem e velocidade de alimentação.....	85
Tabela 18 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência energia de soldagem na profundidade da raiz	87
Tabela 19 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da velocidade de	

alimentação na profundidade da raiz	87
Tabela 20 – Área da zona fundida dos cordões para análise variando energia de soldagem e velocidade de alimentação.....	87
Tabela 21 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência energia de soldagem na área da zona fundida	89
Tabela 22 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da velocidade de alimentação na área da zona fundida.....	89
Tabela 23 – Diluição dos cordões para análise variando energia de soldagem e velocidade de alimentação.....	90
Tabela 24 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência energia de soldagem na diluição	92
Tabela 25 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da velocidade de alimentação na diluição	92
Tabela 26 – Largura dos cordões para análise variando energia de soldagem e vazão do gás de plasma.....	92
Tabela 27 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência energia de soldagem na largura.....	94
Tabela 28 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da vazão do gás de plasma na largura.....	94
Tabela 29 – Reforço dos cordões para análise variando energia de soldagem e vazão do gás de plasma.....	95
Tabela 30 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência energia de soldagem no reforço.....	97
Tabela 31 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da vazão do gás de plasma no reforço	97
Tabela 32 – Largura da raiz dos cordões para análise variando energia de soldagem e vazão do gás de plasma.....	97
Tabela 33 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência energia de soldagem na largura da raiz	99
Tabela 34 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da vazão do gás de plasma na largura da raiz	99
Tabela 35 – Profundidade da raiz dos cordões para análise variando energia de soldagem e vazão do gás de plasma	99
Tabela 36 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência energia de soldagem na profundidade da raiz	101

Tabela 37 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da vazão do gás de plasma na profundidade da raiz.....	101
Tabela 38 – Área da zona fundida dos cordões para análise variando energia de soldagem e vazão do gás de plasma	102
Tabela 39 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência energia de soldagem na área da zona fundida.....	104
Tabela 40 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da vazão do gás de plasma na área da zona fundida.....	104
Tabela 41 – Diluição dos cordões para análise variando energia de soldagem e vazão do gás de plasma	104
Tabela 42 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência energia de soldagem na diluição	106
Tabela 43 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da vazão do gás de plasma na diluição	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AWS	<i>American Welding Society</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
A	Ampère
°C	Celsius
cm/min	Centímetro por minuto
J	Joule
kJ/mm	Quilojoule por milímetro
l/min	Litro por minuto
m/min	Metro por minuto
mm	Milímetros
mm ²	Milímetro quadrado
s	segundo
V	Volts
°K	Kelvin

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivo Geral	20
1.1.1	Objetivos específicos	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Processo de Soldagem a Plasma	22
2.1.1	Princípio de funcionamento	22
2.1.1.1	<i>Formação do arco-plasma e abertura do arco</i>	22
2.1.1.2	<i>Formação do cordão de solda</i>	24
2.2	Técnicas de operação	25
2.2.1	<i>Melt-in (Fusão)</i>	25
2.2.2	<i>Microplasma</i>	26
2.2.3	<i>Keyhole</i>	27
2.3	Parâmetros de soldagem e efeitos na geometria do cordão	29
2.3.1	<i>Corrente de soldagem</i>	29
2.3.2	<i>Velocidade de soldagem</i>	30
2.3.3	<i>Energia de soldagem</i>	31
2.3.4	<i>Gases</i>	32
2.3.4.1	<i>Vazão do gás de plasma</i>	32
2.3.4.2	<i>Gás de proteção</i>	33
2.3.5	<i>Velocidade de alimentação</i>	33
2.3.6	<i>Posicionamento e tocha</i>	34
2.3.6.1	<i>Distância tocha-peça</i>	34
2.3.6.2	<i>Orifício constritor</i>	34
2.3.6.3	<i>Ângulo de afiação e recuo do eletrodo (setback)</i>	35
2.4	Defeitos	36
2.4.1	<i>Porosidades</i>	37
2.4.2	<i>Vazios</i>	38
2.4.3	<i>Falta de penetração</i>	38
2.4.4	<i>Penetração excessiva e humping</i>	39
2.4.5	<i>Mordeduras</i>	40
2.4.6	<i>Trincas</i>	40
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	Materiais	43
3.1.1	<i>Metal de base</i>	43
3.1.2	<i>Metal de adição</i>	44

3.1.3	Bancada de soldagem	45
3.2	Metodologia	49
3.2.1	Planejamento de soldagem	49
3.2.1.1	<i>Testes de soldagem</i>	49
3.2.1.2	<i>Soldagens definitivas</i>	50
3.2.2	Retirada de amostras	52
3.2.2.1	<i>Análise da qualidade dos cordões</i>	52
3.2.2.2	<i>Definição das regiões de análise e corte</i>	52
3.2.3	Preparação metalográfica	55
3.2.4	Análises	56
3.2.4.1	Macrografia	56
3.2.4.2	Medições	57
3.2.4.3	ANOVA e teste de Tukey	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4.1	Testes de soldagem	61
4.2	Análise da qualidade dos cordões das soldagens definitivas	66
4.3	Macrografias	74
4.4	Análise geométrica dos cordões de solda	76
4.4.1	Efeito da energia de soldagem e velocidade de alimentação	77
4.4.1.1	<i>Largura</i>	77
4.4.1.2	<i>Reforço</i>	79
4.4.1.3	<i>Largura da raiz</i>	82
4.4.1.4	<i>Profundidade da raiz</i>	84
4.4.1.5	<i>Área da zona fundida</i>	87
4.4.1.6	<i>Diluição</i>	89
4.4.2	Efeito da energia de soldagem e vazão do gás de plasma	92
4.4.2.1	<i>Largura</i>	92
4.4.2.2	<i>Reforço</i>	94
4.4.2.3	<i>Largura da raiz</i>	97
4.4.2.4	<i>Profundidade da raiz</i>	99
4.4.2.5	<i>Área da zona fundida</i>	101
4.4.2.6	<i>Diluição</i>	104
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	107
	REFERÊNCIAS	108

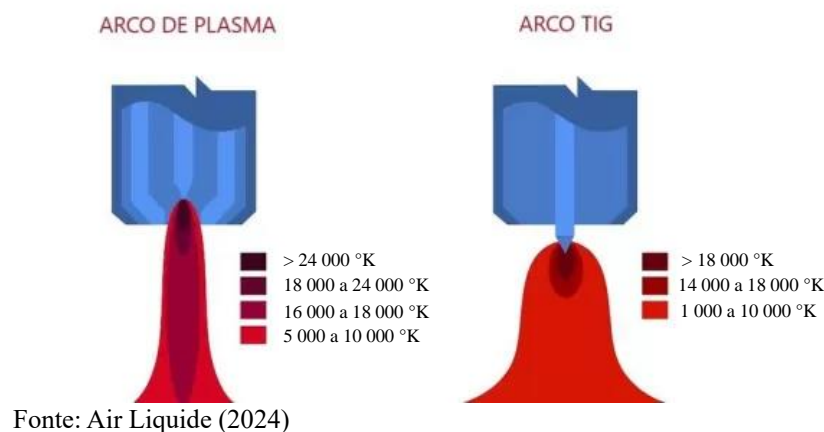
1 INTRODUÇÃO

Desde a Primeira Revolução Industrial, em meados do século XVIII, a busca por maior produtividade, redução de custos e melhoria da qualidade tem sido um dos principais desafios da indústria, incluindo a fabricação de produtos metálicos. Nesse contexto, avanços nos processos de soldagem desempenham um papel essencial, possibilitando a união eficiente de materiais metálicos e atendendo às exigências de diferentes setores industriais.

A soldagem a plasma é um desses avanços, e os primeiros usos arco plasma datam do ano de 1955, quando o americano Robert M. Gage patenteou um dispositivo similar a uma tocha de soldagem TIG, mas com o arco sendo restringido pela passagem através de um orifício no bocal da tocha, para realização de operações de corte. No entanto, o surgimento de equipamentos comerciais de soldagem a plasma e a introdução do processo só vieram ocorrer por volta dos anos 60 (AWS, 1991; Reis; Scotti, 2007).

Este processo, derivado da soldagem TIG, utiliza um arco elétrico altamente concentrado que permite a fusão do metal de base com grande controle térmico e penetração. A constrição do arco e o aumento da densidade de energia, ilustrados na Figura 1, permitem que a soldagem a plasma produza maiores penetrações, possa utilizar níveis de velocidade de soldagem maiores, gere menos distorções e seja capaz de produzir uma zona afetada pelo calor muito menor, quando comparada ao processo TIG.

Figura 1 – Efeito da constrição do arco



Dentre as variações da soldagem a plasma, destaca-se a técnica *keyhole*, com a qual é possível obter cordões de penetração total em um único passe. Essa característica torna o processo altamente atrativo, especialmente quando se busca alta eficiência, além de possuir um

menor custo em comparação com soldagens por feixe de laser (LBW) e de elétrons (EBW) (Fuerschbach; Knorovsky, 1991). No entanto, apesar de suas vantagens, a soldagem a plasma enfrenta alguns desafios que limitam sua aplicação como o alto custo inicial dos equipamentos, a complexidade no controle dos parâmetros de soldagem e a necessidade de operadores qualificados.

A principal aplicação da soldagem a plasma ocorre na união de aços inoxidáveis de médias espessuras (Reis; Scotti, 2007). Além disso, o processo é amplamente utilizado em setores como o automotivo, aeroespacial, aeronáutico, químico, naval e na fabricação de tubos, onde a integridade estrutural das juntas soldadas é essencial.

Dado que o bom desempenho dos componentes soldados está diretamente relacionado à qualidade e geometria dos cordões de solda, uma vez que defeitos do tipo excesso de penetração podem atuar como concentradores de tensão e comprometer a resistência da junta, compreender os efeitos dos parâmetros de soldagem é essencial para garantir juntas de alta integridade estrutural. No caso específico da técnica *keyhole*, a geometria do cordão está diretamente ligada à estabilidade do processo, que, por sua vez, depende do controle preciso dos parâmetros de soldagem (Martikainen; Moisis, 1993).

Como essa estabilidade está diretamente atrelada ao controle preciso dos parâmetros de soldagem, este trabalho visou a realização de um estudo preliminar para compreender a influência da energia de soldagem, velocidade de alimentação do arame e vazão do gás de plasma na geometria dos cordões de solda em juntas de topo. Os resultados obtidos reforçam a importância da escolha adequada desses parâmetros para a obtenção de cordões de solda com qualidade e estabilidade adequadas.

1.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo preliminar dos efeitos dos parâmetros do processo de soldagem a plasma *keyhole* com alimentação de arame frio AWS A5.9 ER317L na geometria de cordões de solda em juntas de topo, usando como metal base o aço inoxidável ABNT 304.

1.1.1 Objetivos específicos

- a) Avaliar o efeito da energia de soldagem, velocidade de alimentação e vazão do gás de plasma no aspecto superficial dos cordões de solda.

- b) Verificar a presença de descontinuidades na solda, poros, trincas, mordeduras, falta de fusão, dentre outros.
- c) Analisar os parâmetros geométricos dos cordões:
 - a. Largura;
 - b. Reforço;
 - c. Largura e profundidade da raiz;
 - d. Diluição.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processo de Soldagem a Plasma

A soldagem a plasma (*Plasma Arc Welding* - PAW) é um processo que promove a união dos metais fundindo-os por meio do aquecimento gerado por um arco elétrico constricto e colimado entre o eletrodo não consumível e a peça, quando se trata de um arco transferido, ou entre o eletrodo e o bocal de constrição, no caso de um arco não transferido. O desenvolvimento desta técnica se deu a partir dos conhecimentos acerca do processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*), o que se confirma pela similaridade entre os processos (AWS, 1991).

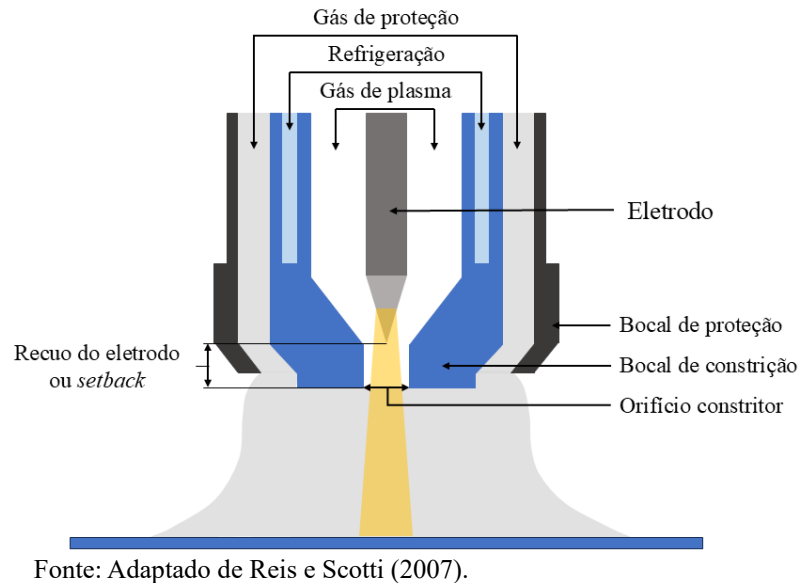
2.1.1 Princípio de funcionamento

Nos tópicos a seguir, são apresentados aspectos essenciais para compreensão do princípio de funcionamento do processo em questão. Estes tópicos tratam da abertura e formação o arco-plasma, característico da soldagem PAW, bem como da formação do cordão de solda.

2.1.1.1 Formação do arco-plasma e abertura do arco

Na soldagem a plasma, conforme a Figura 2, o eletrodo encontra-se no interior da tocha de soldagem e recuado em relação ao bocal de constrição. Esse recuo é denominado de “*setback*” ou “recuo do eletrodo”. No interior da cavidade onde situa-se o eletrodo, é direcionado o gás de plasma, o qual, de acordo com Reis e Scotti (2007), é aquecido de modo suficiente para haver a dissociação das moléculas e subsequente ionização, ou seja, ser constituído de íons e elétrons livres em equilíbrio. Deste modo, o gás deixa de ser isolante e passa a ser condutor, além de possuir baixa resistividade elétrica e se tornar capaz de conduzir correntes de alta intensidade.

Figura 2 – Fluxo dos gases no interior da tocha de soldagem



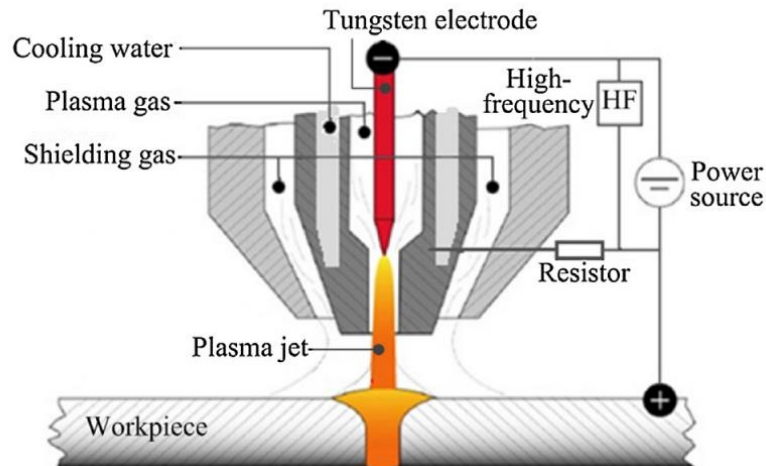
Aliado a isto, o estreitamento no interior da tocha e o orifício constritor forçam a saída do gás por um diâmetro inferior ao de entrada, aumentando a energia cinética do arco, conferindo-lhe um aspecto colunar e transformando-o em um jato de plasma. Devido à pequena área que o jato de plasma consegue cobrir, torna-se necessária a utilização de um segundo gás para realizar a proteção da poça de fusão, o gás de proteção, que é direcionado através do bocal de proteção.

Neste tipo de soldagem, devido ao *setback*, não é possível realizar a abertura do arco através de um curto-circuito provocado pelo contato entre o eletrodo e o substrato. Sendo assim, utiliza-se um ignitor de alta frequência (módulo plasma) para gerar picos de tensão tornando capaz a abertura de um arco de baixa intensidade entre o eletrodo e o bico de constrição, o arco piloto, o qual aquece e ioniza o gás presente na cavidade de forma suficiente para transformá-lo em um plasma, mas não o suficiente para provocar a fusão dos materiais (AWS, 1991; Moura Filho, 2014; Oliveira, 2001)

Embora incapaz de fundir os materiais, o arco-piloto facilita a abertura do arco entre o eletrodo de tungstênio e a peça (arco transferido), pois, como explicado anteriormente, o gás ionizado possui baixa resistividade elétrica. Dessa forma quando a fonte de energia é acionada, gerando altas correntes, é possível formar um fluxo de plasma mais intenso, denominado de arco principal, o qual possui energia capaz de realizar a fusão.

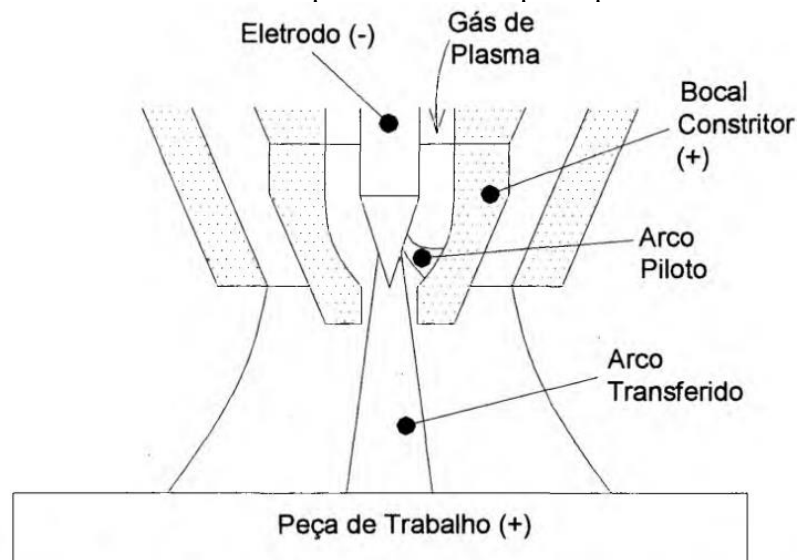
A Figura 3 ilustra o sistema elétrico para haver a ignição do arco piloto e a Figura 4 ilustra a abertura do arco piloto e sua conseqüente transferência para o arco principal.

Figura 3 – Esquema elétrico para abertura do arco piloto



Fonte: Liu et al., (2016, p. 316).

Figura 4 – Abertura do arco piloto e do arco principal



Fonte: Oliveira (2001, p. 8).

2.1.1.2 Formação do cordão de solda

De uma forma geral, a constituição do cordão de soldagem dar-se-á em função dos efeitos térmico e mecânico. Segundo Reis e Scotti (2007), a ação térmica é devida a dois fatores. O primeiro, e principal, deve-se ao acoplamento do arco ao metal base por regiões penetradas por elétrons (manchas anódicas), as quais geram calor e acompanham o arco elétrico, em consequência da movimentação da tocha de soldagem. O segundo, deve-se à energia interna adquirida pelos átomos do gás durante o aquecimento que resultará no estado plasmático, isto

é, a entalpia de ionização, a qual transfere calor para a peça tanto por condução como por convecção.

Já o efeito mecânico se dá em função de dois mecanismos: o próprio jato de plasma e a pressão aplicada à poça de fusão. No primeiro mecanismo, o metal líquido é direcionado para as bordas da poça em razão do impacto do jato de plasma. E, no segundo, devido a corrente conduzida pelo arco elétrico são gerados campos magnéticos os quais, por sua ação mecânica, exercem pressão sobre a poça de fusão (Reis; Scotti, 2007).

2.2 Técnicas de operação

A soldagem a plasma pode ser realizada em diferentes tipos. Nos tópicos a seguir, serão apresentados os três principais modos operacionais desse processo, sendo eles: *melt-in*, microplasma e keyhole.

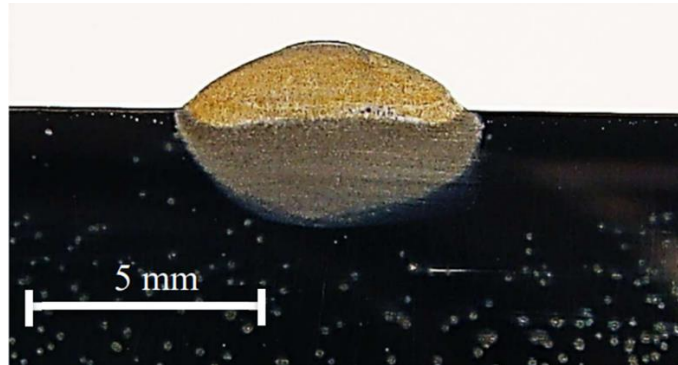
2.2.1 Melt-in (Fusão)

O modo operacional *melt-in*, ou média corrente, é operado em uma faixa de corrente de 15 e 200, sendo comumente utilizado em soldagem manual e com menor fluxo de gás de plasma (Marques; Modenesi; Bracarense, 2017). Nessa variante do processo, devido à baixa vazão do gás, a força exercida sobre a poça de fusão é similar a um processo de arco aberto e torna-se concorrente ao processo TIG (Reis, 2005), formando, até mesmo, cordões de solda com formato semelhante à uma tigela (Harris, 1993).

Embora similares, o que diferencia o modo de média corrente da soldagem TIG são as altas densidades de energia provocadas pelo arco constrito, o qual, conforme a American Welding Society (1991), permite um maior controle da penetração, podendo reduzir o tempo de soldagem.

A Figura 5 apresenta um exemplo de cordão de solda produzido pela modo operacional *melt-in*.

Figura 5 – Cordão de solda produzido pela técnica *melt-in*



Fonte: Rosa et al. (2021, p. 6).

2.2.2 Microplasma

Também conhecido como baixa corrente, a técnica de operação microplasma caracteriza-se por usar níveis de corrente menores que os outros modos de operação da soldagem a plasma, estando em uma faixa de 0,1 a 15 A. De acordo com Richetti (2003), essa técnica foi desenvolvida para preencher a lacuna existente para esse intervalo de corrente, o qual não era realizado por qualquer outro processo de soldagem a arco.

A soldagem microplasma é geralmente utilizada de forma manual e para soldar chapas muito finas, variando de 0,02 a 1 milímetro de espessura, realizando a soldagem autógena (sem metal de adição) com um arco pequeno, de formato similar a uma agulha, estabelecido entre o eletrodo e a peça. Por esta característica do arco, essa técnica gera níveis de distorções mais baixos (se as condições forem bem selecionadas) e é capaz de soldar componentes pequenos e delicados, sendo utilizada na soldagem de equipamentos eletrônicos e cirúrgicos (Reis; Scotti, 2007).

A Figura 6 apresenta um exemplo de tocha utilizada no processo de soldagem microplasma manual e a Figura 7 ilustra um cordão de solda produzido em chapa fina (0,7 mm de espessura) através da soldagem microplasma.

Figura 6 – Tocha utilizada na soldagem microplasma



Fonte: AUTOGEN-RITTER GmbH

Figura 7 – Exemplo de junta produzida em chapa fina com a soldagem microplasma



Fonte: Golański et al. (2018, p. 59).

2.2.3 Keyhole

O modo keyhole é a característica mais marcante que diferencia o processo de soldagem a plasma do TIG, sendo também o recurso que o torna tão atrativo (Fan; Kovacevic, 1999; Lucas, 1990). Esta técnica possui sua faixa de operação acima de 100 A de corrente e pode ser operada com ou sem alimentação. Em chapas de 2,5 a 6,4 mm de espessura, é possível a realização do processo autógeno, mas, para espessuras superiores, faz-se necessária a preparação da junta com chanfro e uso de metal de adição (Kou, 2003; Reis; Scotti, 2007).

A técnica *keyhole* recebe esta nomenclatura porque, devido à pressão do fluxo de plasma combinada à alta densidade de energia, o arco de plasma escava o metal base, deslocando o metal fundido para a superfície até que a perfure, formando um pequeno orifício circular, como mostra a (AWS, 1991; Martikainen; Moisio, 1993; Reis; Scotti, 2007; Richetti, 2003). À medida que o orifício avança junto à tocha de soldagem, o metal derretido à frente flui

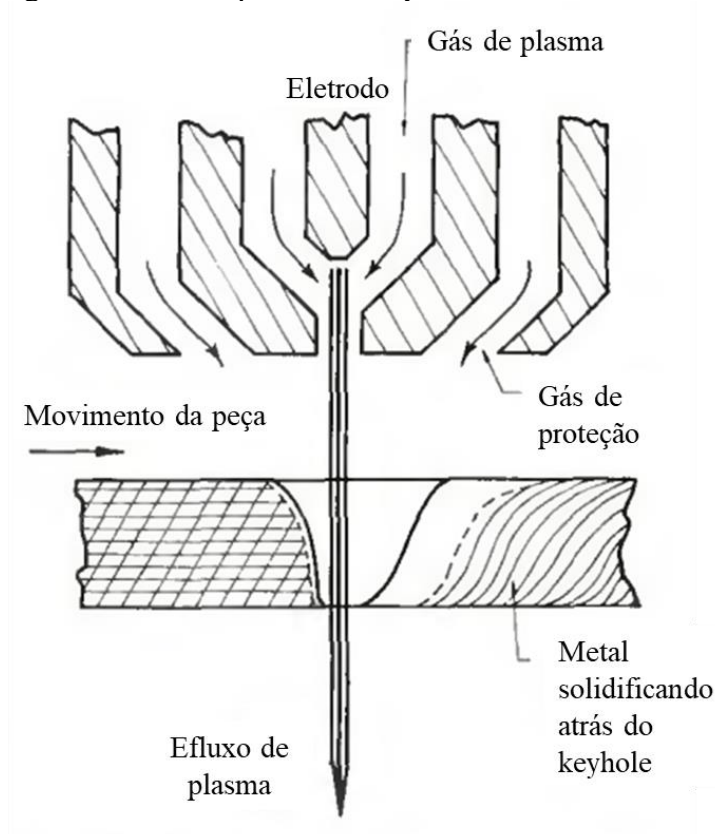
para a parte posterior do *keyhole*, onde solidificará e formará o cordão de solda (AWS, 1991; Martikainen; Moisio, 1993; Metcalfe; Quigley, 1975), conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 8 – Orifício formado na soldagem *keyhole*



Fonte: Martikainen e Moisio (1993, p. 330-s).

Figura 9 – Modo operacional *keyhole*



Fonte: Metcalfe e Quigley (1975, p. 401-s).

2.3 Parâmetros de soldagem e efeitos na geometria do cordão

Como já visto, os parâmetros de soldagem influenciam tanto na manutenção do *keyhole* quanto na geometria do cordão de solda a ser formado. Com isto em mente, neste tópico serão descritos alguns dos principais parâmetros de soldagem e como eles afetam o formato do cordão.

2.3.1 Corrente de soldagem

Considerado um parâmetro primário, a corrente de soldagem pode ser do tipo contínua, pulsada ou alternada, sendo a corrente contínua em polaridade direta (CC-) a mais utilizada, onde a emissão dos elétrons ocorre do eletrodo para a peça (emissão termiônica) e gera um menor desgaste do eletrodo (Reis; Scotti, 2007; Richetti, 1998, 2003). No entanto, em alguns materiais, não é possível a realização da soldagem com esse tipo de corrente e faz-se necessária a aplicação dos outros modos.

O aumento da corrente irá aumentar a densidade de energia e a temperatura do arco, fornecendo uma maior quantidade de calor e provocando uma expansão térmica do gás de plasma mais intensa, fazendo com que haja um aumento da energia cinética do mesmo e o arco passa a exercer maior pressão sobre a poça de fusão (Richetti, 2003). Deste modo, o jato de plasma consegue deslocar uma massa maior de material e forma uma poça de fusão também maior (Richetti, 1998).

Segundo Reis e Scotti, (2007, p. 108), “de uma forma geral, quanto maior a corrente, maior a largura e a penetração do cordão”. Todavia, para a soldagem *keyhole*, como a penetração total já é parte do processo, ao aumentar a corrente e, por consequência, o volume de metal fundido, a tensão superficial pode não ser mais capaz de manter a poça em seu lugar, provocando seu afundando e gerando penetrações excessivas (Metcalf; Quigley, 1975). Deste modo, é preciso aumento da velocidade de soldagem para compensar os efeitos do acréscimo na corrente (Pinfold; Jubb, 1973 apud Richetti, 2003). Já correntes muito baixas podem não ser suficientes para abertura do *keyhole* (Reis; Scotti, 2007).

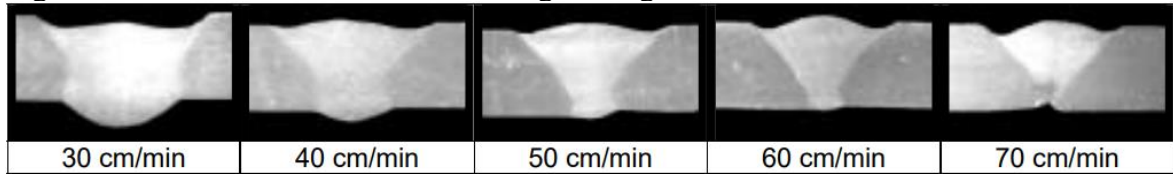
2.3.2 Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem não possui interferência direta nas características do arco, porém, tem grande impacto na geometria do cordão de solda (Richetti, 1998). Ao utilizar velocidades de soldagem maiores e manter os demais parâmetros constantes, como a energia de soldagem (quantidade de calor por unidade de comprimento) é inversamente proporcional a velocidade de soldagem, ou seja, quanto maior a velocidade menor a energia, menos calor será fornecido e reduzirá a quantidade de metal fundido (Reis; Scotti, 2007).

Desta maneira, se níveis de velocidade de soldagem muito elevados forem utilizados é possível que ocorra falta de penetração e/ou mordeduras, mas ao usar níveis muito inferiores, a quantidade de calor por comprimento será maior e, por consequência, o volume de metal fundido também, fazendo com que a tensão superficial não seja capaz de manter o material em seu devido local e escorra (Richetti, 1998). Sabendo disto, muitas vezes a velocidade de soldagem pode ser uma boa ferramenta para controlar a penetração do cordão (Richetti, 2003).

A Figura 10 mostra o comportamento do cordão em função da variação na velocidade de soldagem.

Figura 10 – Efeito da velocidade de soldagem na geometria do cordão



Fonte: Richetti (2003, p. 106)

2.3.3 Energia de soldagem

A energia de soldagem, nos processos a arco, é dada pela energia que o próprio arco fornece à peça por unidade de comprimento expressa em joules por milímetro (J/mm)(AWS, 1987). A expressão para o cálculo da energia, de acordo com a referência citada, está descrita na Equação 1, onde U representa a tensão de soldagem em volts (V), I é a corrente de soldagem em ampères (A) e v_s é a velocidade de soldagem em milímetros por segundo (mm/s).

$$E = \frac{U \times I}{v_s} \quad (1)$$

Logo, para entender a influência da energia de soldagem nos aspectos geométricos do cordão de solda, é preciso compreender como a corrente, a tensão e a velocidade de soldagem impactam na energia fornecida à peça. Como é perceptível na Equação 1, a energia é proporcional à tensão e corrente de soldagem e inversamente proporcional à velocidade de soldagem.

Além disso, como apresentado anteriormente, o aumento da energia de soldagem irá resultar em uma maior quantidade de calor fornecido à peça por comprimento, isso aumentará o volume de material fundido e a penetração do cordão. No caso do modo *keyhole*, se a energia for muito alta e o volume de material fundido aumentar demasiadamente, é possível que o mesmo não se mantenha na região devida e escorra de forma excessiva. Por outro lado, a redução da energia de modo excessivo pode não haver a penetração necessária ou, no caso do *keyhole*, haver falta de penetração, não conseguir abrir o orifício característico do processo ou, se aberto, haver dificuldades de mantê-lo estável.

2.3.4 Gases

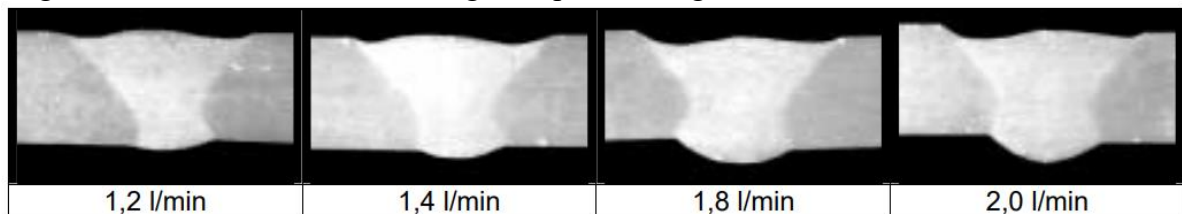
Conforme mencionado anteriormente, a soldagem a plasma opera com, pelo menos, dois gases: gás de plasma e proteção, podendo ser adicionado um terceiro, o gás de purga. A seguir, serão descritas as influências dos dois primeiros na soldagem e na formação do cordão de solda.

2.3.4.1 Vazão do gás de plasma

A vazão do gás de plasma é o parâmetro mais significativo no que diz respeito à energia cinética do arco e, conseqüentemente, pressão por ele exercida (Reis; Scotti, 2007). O aumento da vazão provoca o aumento da força que o arco exerce sobre a poça de fusão, fazendo com que um maior volume de material seja fundido e aumente a penetração, já que o metal tenderá a descer (Richetti, 1998).

É certo que, a vazão aplicada é função do modo operacional que se deseja, seja *keyhole*, *melt-in* ou microplasma. Para o método “buraco de fechadura” é exigido um fluxo maior deste gás, para que haja a perfuração da chapa e manutenção do orifício formado (Reis; Scotti, 2007). Contudo, quando a vazão de gás é muito alta, o metal pode não se manter na região devida ou, até mesmo, ser expulso e provocar o corte da peça (Richetti, 2003).

Figura 11 – Influência da vazão do gás de plasma na geometria do cordão



Fonte: Richetti (2003, p. 104).

Além da vazão, outro fator que pode interferir no formato do cordão é a composição do gás utilizado, onde, geralmente, emprega-se o argônio puro ou misturas de argônio com hélio ou hidrogênio (Reis; Scotti, 2007). De acordo com esta mesma referência, as misturas de argônio e hidrogênio são usadas para obtenção de cordões mais limpos, devido à atmosfera redutora, e de um arco mais concentrado. O hidrogênio cria uma espécie de “barreira” em torno do argônio, visto que ambos não se misturam homogeneamente, e isto restringe o arco, se assemelhando ao efeito de contração mecânica provocado pelo bico, mas trata-se, na verdade,

de uma constrição termodinâmica. Este efeito aumenta a densidade de energia e, por consequência, provoca o aumento da penetração.

Já as misturas de argônio e hélio, segundo Reis e Scotti (2007), são indicadas para os casos onde há restrições para o uso do hidrogênio. O efeito do hélio é similar àquele provocado pelo hidrogênio, cria-se uma “barreira” que focaliza o arco, aumenta a densidade de energia e a penetração. Devido aos custos do hélio, geralmente as misturas possuem até 10% deste componente e aplicá-lo em maiores concentrações não é justificável em função de melhores resultados.

2.3.4.2 Gás de proteção

A escolha do gás de proteção dependerá do material de base e o objetivo de sua utilização é evitar a contaminação do arco e da poça de fusão (Harris, 1993; Reis; Scotti, 2007; Richetti, 2003). Martikainen e Moisis (1993, p. 338-s) afirmam que “o efeito do gás de proteção na qualidade da solda da soldagem a plasma não é tão importante quanto o gás de plasma, mas não pode ser totalmente ignorado”.

A vazão do gás de proteção atuará na qualidade e geometria dos cordões em função da condutividade térmica do gás utilizado e, portanto, de sua composição química. Embora, vazões muito altas possam provocar um escoamento turbulento e prejudicar a proteção da solda (Reis; Scotti, 2007).

Ao utilizar o argônio puro, devido ao seu baixo potencial de ionização, as regiões próximas à extremidade podem ser ionizadas e provocar um alargamento da coluna de plasma (Richetti, 2003). Já as misturas argônio-hélio e argônio-hidrogênio podem gerar um efeito de constrição do arco similares aos provocados pela composição do gás de plasma (Reis; Scotti, 2007).

2.3.5 Velocidade de alimentação

No processo de soldagem a plasma, o metal de adição é geralmente utilizado na união de juntas preparadas com chanfro, a fim de compensar o volume de material retirado no preparo (Reis e Scotti, 2007). O modo operacional *keyhole* pode ser operado com ou sem metal de adição, sendo que seu uso pode evitar a ocorrência de mordeduras, promover a obtenção de um pequeno reforço, cumprir funções metalúrgicas e aumentar a estabilidade do processo (AWS, 1991; Martikainen; Moisis, 1993; Reis; Scotti, 2007; Richetti, 2003).

Nas soldagens a arco em geral, o uso de alimentação dificulta a transferência de calor para o metal base. Em função do volume de material adicionado, parte da energia do arco é utilizada para fundir essa adição de material, reduzindo a quantidade de calor que chega à peça (Reis; Scotti, 2007).

Segundo Reis e Scotti, (2007), no caso da soldagem a plasma, para uma mesma condição de corrente e velocidade de soldagem, ou seja, para uma mesma energia de soldagem, quando a taxa de metal adicionado aumenta, o volume da poça de fusão também é acrescido, no entanto a penetração será menor. Isto ocorre de tal modo que, de acordo com Richetti, (2003), para manter a penetração, comparada às soldagens autógenas, é preciso haver um aumento de corrente em cerca de 20 a 30%.

2.3.6 Posicionamento e tocha

Além dos parâmetros anteriores, outros aspectos também podem influenciar a soldagem. Detalhes como alinhamento da tocha à junta, a distância entre elas (tocha e peça), dentre outras variáveis, possuem influência sobre o arco e a qualidade da solda. Neste tópico será apresentado como esses componentes impactam a soldagem.

2.3.6.1 Distância tocha-peça

Segundo a American Welding Society (1991), umas das principais vantagens do processo de soldagem a plasma está em seu arco ser pouco sensível a variações na distância tocha-peça, tendo poucos efeitos na dimensão do cordão ou na concentração de calor. Todavia, como ressaltam Reis e Scotti (2007), aumentar este parâmetro descontroladamente pode trazer instabilidades ao arco e aumentar a perda de calor para o meio, sendo 6 mm o valor máximo para esta distância.

Embora não muito sensível à esta variável, Richetti (2003) enfatiza que o aumento da distância tocha-peça provoca uma dispersão do arco, reduzindo a pressão exercida por este e, conseqüentemente, diminuído a penetração do cordão.

2.3.6.2 Orifício constritor

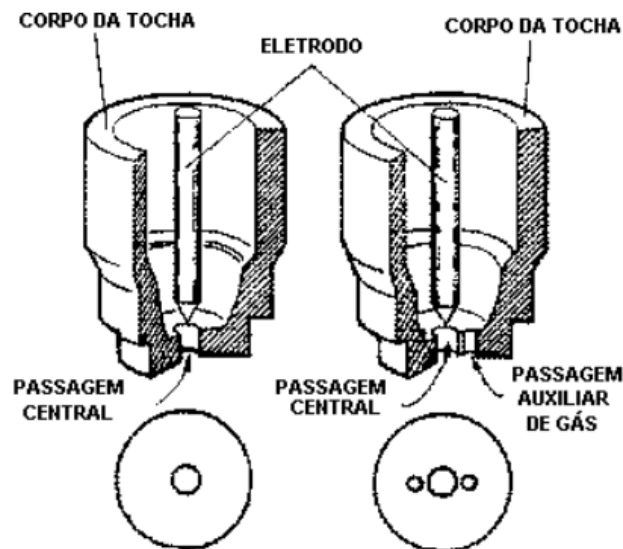
De acordo com Reis (2005, p. 11), “o bocal de constrição é responsável pelo efeito de constrição física do arco e o diâmetro de seu orifício pode afetar consideravelmente a

soldagem”. Ao aumentar o diâmetro do orifício constritor, ocorre uma diminuição da força exercida pelo arco sobre a poça de fusão e na densidade de energia, reduzindo o volume de metal fundido e diminuindo a penetração (Reis; Scotti, 2007).

Ainda de acordo com Reis e Scotti (2007), é válido salientar que, embora o uso de bocais com orifícios menores provoque uma maior densidade de energia para uma mesma corrente, quanto menor o orifício, também é menor a corrente de soldagem que o mesmo pode operar, devido à formação de arco duplo e geração de danos ao bocal.

Há dois tipos de bocais de contração, aqueles com um único orifício e os com orifícios auxiliares, conforme apresentado na Figura 12. No caso dos bocais com múltiplos orifícios, parte do gás é expelido pelo furo central e outra parte pelos orifícios adjacentes. O fluxo oriundo destes é relativamente mais frio e deixa o arco levemente alongado, com formato similar a uma elipse (Reis, 2005).

Figura 12 – Tipos de bocais de proteção

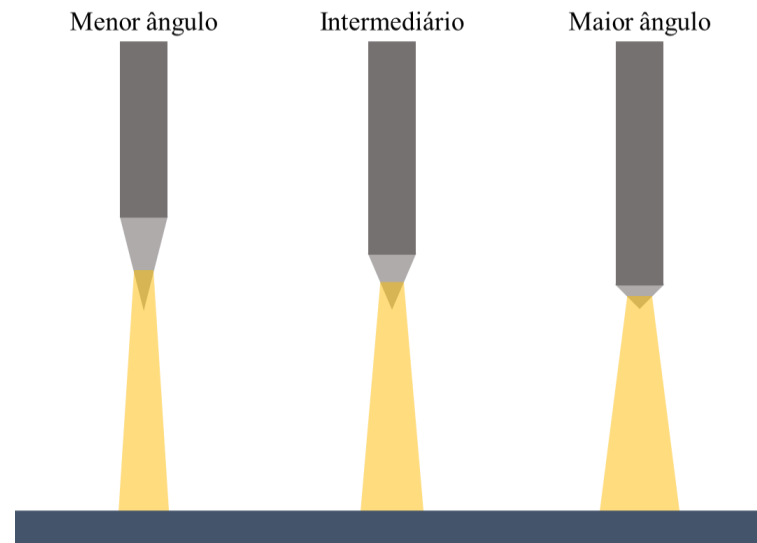


Fonte: Núcleo Tecnológico de Soldagem & Qualidade, (2002, p. 9).

2.3.6.3 Ângulo de afiação e recuo do eletrodo (*setback*)

Em relação ao eletrodo, há dois fatores principais: a afiação e o recuo. Como o arco busca manter a área de emissão pela ponta do eletrodo, se o ângulo de ponta aumenta o arco tende a “descer” e aproximar-se da ponta (Reis; Scotti, 2007), como ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Mudança no arco em função da afiação do eletrodo



Fonte: Adaptado de Reis e Scotti (2007).

Porém, como no processo *keyhole* o eletrodo está completamente retrocedido no interior da tocha, a variável que provoca maior impacto é o recuo do eletrodo, que atua no grau de constrição do arco. Deste modo, quanto maior o *setback* maior a influência do bocal de constrição sobre o arco, deixando-o mais colimado e com maior concentração de energia. Por outro lado, quanto menor o recuo, menor o efeito de constrição e os cordões produzidos serão mais largos e com penetrações menores (Reis; Scotti, 2007; Richetti, 2003).

2.4 Defeitos

De acordo com Richetti (1998, p. 37), “defeitos de soldagem são descontinuidades que são incorporadas ao cordão de solda”. As descontinuidades na soldagem, conforme a American Welding Society (1987), podem ser referentes a operação e processo, ao projeto ou ao próprio comportamento metalúrgico.

As relativas ao projeto estão relacionadas a mudanças no formato da peça, seção transversal ou a outros detalhes como o tipo de junta. Aquelas classificadas como metalúrgicas geralmente são provocadas por mudanças nas propriedades dos metais envolvidos no processo que normalmente são apresentadas na forma de trincas, alterações microestruturais, dentre outros. Já as descontinuidades atreladas ao procedimento e processo, estão mais relacionadas com a operação da soldagem em si, como por exemplo a escolha de parâmetros, e são classificadas em geométricas e outras (AWS, 1987).

No processo de soldagem a plasma, os defeitos podem ser tanto superficiais como internos (AWS, 1991) conforme apresentado na Tabela 1, que exhibe os defeitos mais comumente encontrados e onde se localizam.

Tabela 1 – Defeitos na soldagem a plasma

Defeitos	
Superficiais	Internos
Reforço excessivo	Porosidades
Deposição insuficiente	Vazios
Mordeduras	Falta de fusão
Desalinhamento	Contaminação
Falta de penetração	Trincas
Contaminação	

Fonte: American Welding Society, (1991, p. 349)

Nos tópicos a seguir, serão apresentados alguns desses defeitos e outros que podem ser encontrados no processo e sua relação com os parâmetros de soldagem.

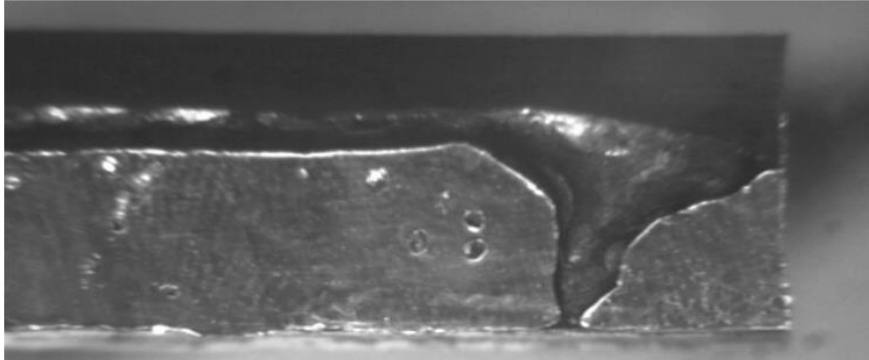
2.4.1 Porosidades

Segundo Richetti, (2003), as porosidades são pequenos vazios no interior ou superfície do cordão devido ao aprisionamento de gases em função da absorção destes pelo metal líquido. De acordo com autos, o modo *keyhole* permite que, através do feixe do arco, os gases dissolvidos possam ser expulsos antes que haja a solidificação e sejam retidos no cordão, embora haja um certo limite e as porosidades ainda assim possam surgir nesse processo.

De acordo com a American Welding Society (1987), as porosidades geralmente apresentam um formato esférico, mas também podem ser um pouco alongadas. A figura ilustra um exemplo de cordão com porosidade.

Na Figura 14 é possível observar um exemplo de cordão de solda produzido com a técnica *keyhole* que apresenta porosidades.

Figura 14 – Porosidades



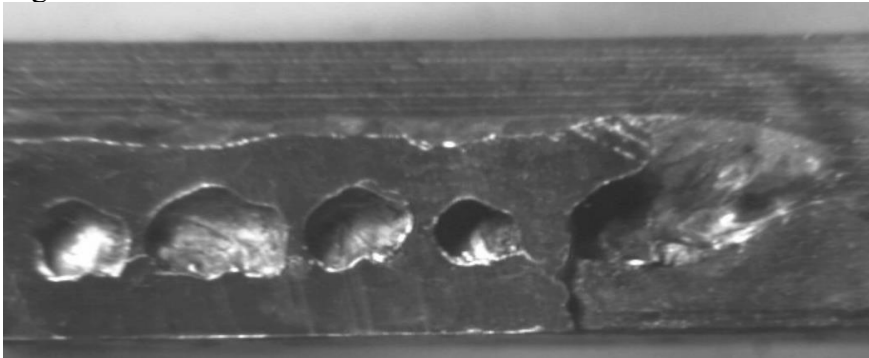
Fonte: Richetti e Ferraresi (2000).

2.4.2 Vazios

Assim como as porosidades, os vazios também são devidos ao aprisionamento de gases, sendo que, neste caso, se deve a entrada forçada dos gases pela parte inferior da poça de fusão, geralmente associado à energia insuficiente para manutenção do *keyhole*.

Na Figura 15, observa-se a ocorrência de vazios em um corsão de solda produzido através do modo operacional *keyhole*.

Figura 15 – Vazios

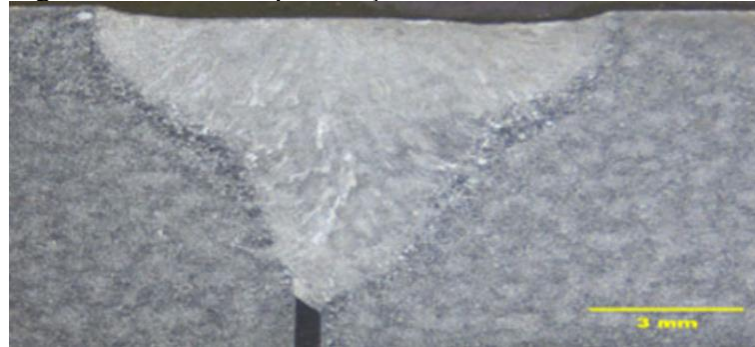


Fonte: Richetti e Ferraresi (2000).

2.4.3 Falta de penetração

A falta de penetração, conforme explicado anteriormente, está diretamente relacionada com uma energia de soldagem e pressão de arco insuficientes. No caso do modo *keyhole*, mais especificamente, o qual é característico por ser um processo de penetração total, está intimamente relacionado com a velocidade e corrente de soldagem e a vazão do gás de plasma (Richetti, 2003).

Figura 16 – Falta de penetração



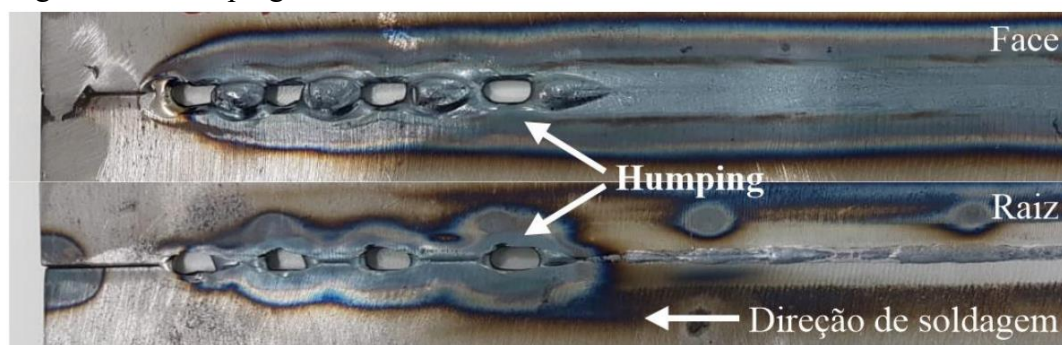
Fonte: Sam Infant Jones et al. (2023, p. 1500).

2.4.4 Penetração excessiva e humping

O excesso de penetração em um cordão de soldagem, devido questões geométricas, atua como um concentrador de tensões e, de modo contrário à falta, se deve justamente à corrente de soldagem e vazão de plasma elevados e/ou velocidades de soldagem menores (Richetti, 2003).

Um defeito relacionado com a penetração excessiva é o “*humping*”, Figura 17. De acordo com Richetti (1998), este defeito é caracterizado por saliências no cordão de solda separadas por intervalos quase uniformes, e sua ocorrência está relacionada, também, com as elevadas pressão do arco e energia de soldagem, de tal modo que o *keyhole* é capaz de movimentar a poça no sentido contrário e formar protuberâncias.

Figura 17 – Humping



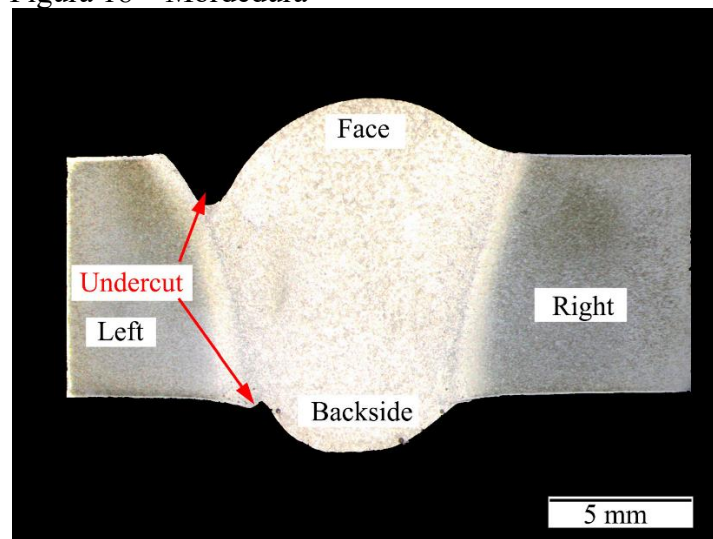
Fonte: Wiggers et al. (2022).

2.4.5 Mordeduras

Segundo a American Welding Society (1987), as mordeduras formam uma espécie de entalhe na superfície da solda, geralmente paralelo à junta e podendo ocorrer no topo ou na raiz, em ambos os lados do cordão ou em apenas um.

A Figura 18 mostra a ocorrência de mordedura em apenas um lado do cordão tanto na face (reforço) como na raiz.

Figura 18 – Mordedura



Fonte: Zhao, Yang e Fan (2024, p. 12).

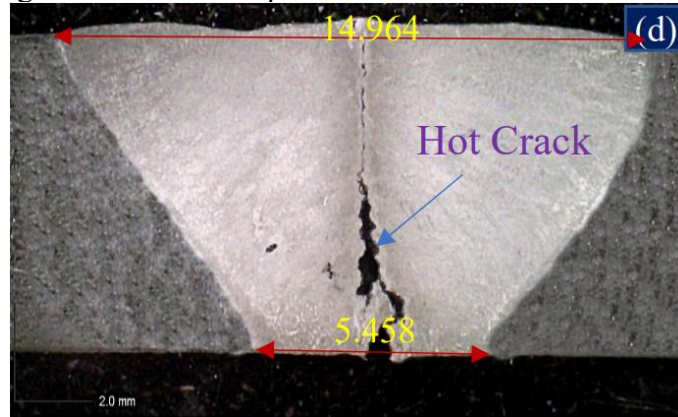
As mordeduras são, em sua maioria, devido a técnicas incorretas de soldagem, níveis de corrente muito elevados ou a combinação de ambos os fatores (AWS, 1987). Contudo, Martikainen e Moisio (1993) apresentam que, além da corrente inadequada, a formação de mordeduras também pode estar relacionada com instabilidades no *keyhole*, velocidade de soldagem muito alta, além de outros fatores.

2.4.6 Trincas

As trincas ocorrem quando as tensões nos metais de solda e de base, causadas devido a contração e expansão térmica localizada, ultrapassam a resistência máxima do metal, podendo ser trincas a quente ou a frio, sendo que na soldagem a plasma são mais comuns as trincas de solidificação (a quente), as quais estão relacionadas com a segregação entre os grãos e formação de filmes líquidos (AWS, 1987; Modenesi; Marques; Santos, 2012; Richetti, 2003).

Na Figura 19 é possível observar um exemplo de trinca a quente ocorrido em uma soldagem a plasma keyhole.

Figura 19 – Trinca a quente

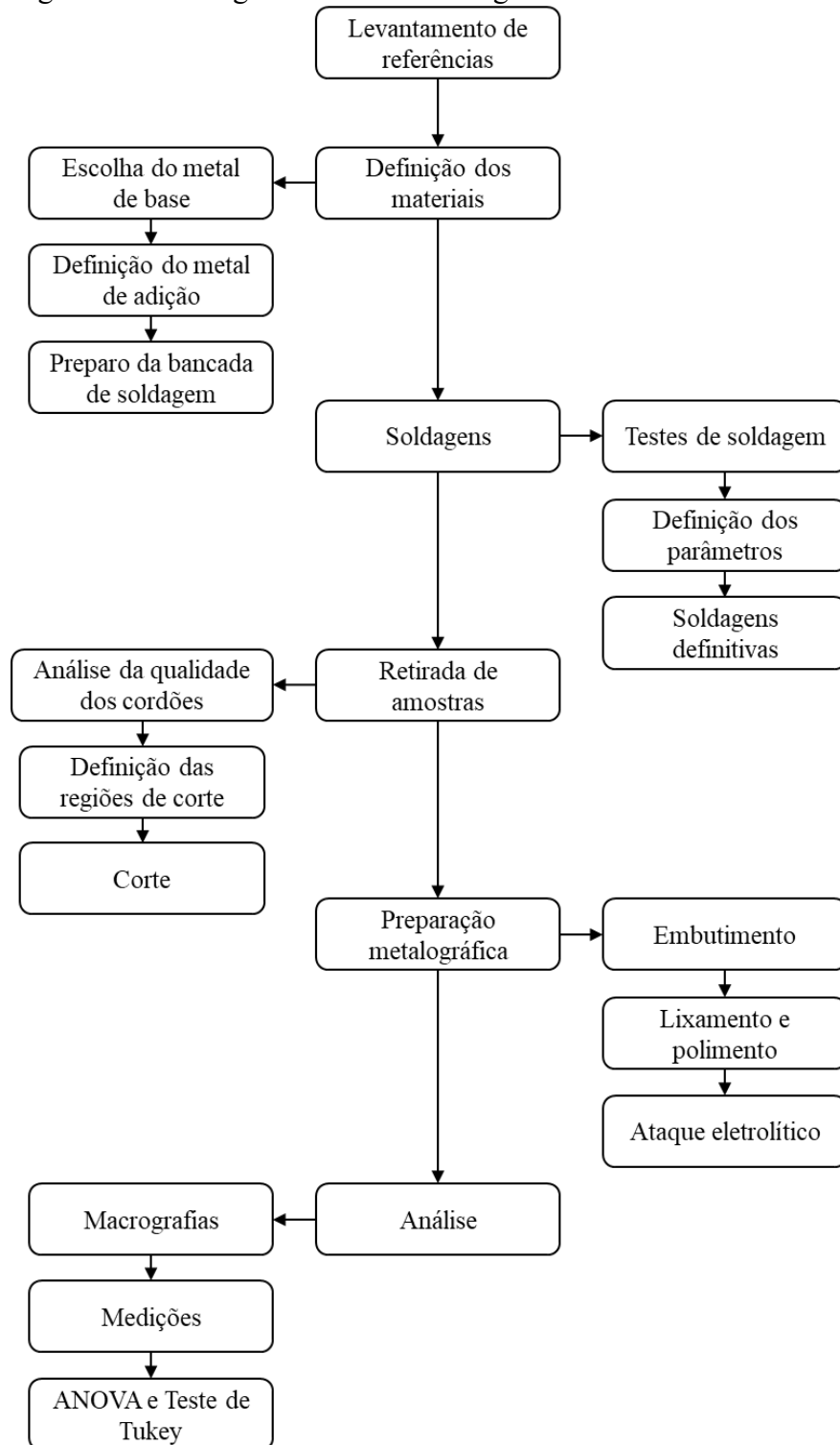


Fonte: Sathishkumar et al. (2020, p. 3302).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para melhor organização e compreensão, o presente trabalho foi realizado em etapas, as quais encontram-se elencadas na Figura 20 e serão melhor detalhadas nos tópicos a seguir.

Figura 20 – Fluxograma com metodologia adotada



Fonte: Elaborado pela autora.

3.1 Materiais

A escolha e definição de materiais foi realizada na seguinte ordem: escolha do metal de base, seleção do metal de adição e organização da bancada. Essas etapas encontram-se descritas e detalhadas nos tópicos a seguir.

3.1.1 Metal de base

Para este estudo, foram produzidas juntas justapostas através do processo de soldagem a plasma *keyhole* com alimentação de arame frio, utilizando como metal base duas chapas de aço inoxidável austenítico ABNT 304 com 57 milímetros de largura, 105 milímetros de comprimento e 3 milímetros de espessura, conforme Figura 21.

Figura 21 – Chapas de aço inoxidável ABNT 304



Fonte: Própria da autora.

A faixa de composição química do metal base pode ser verificada na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química do metal de base

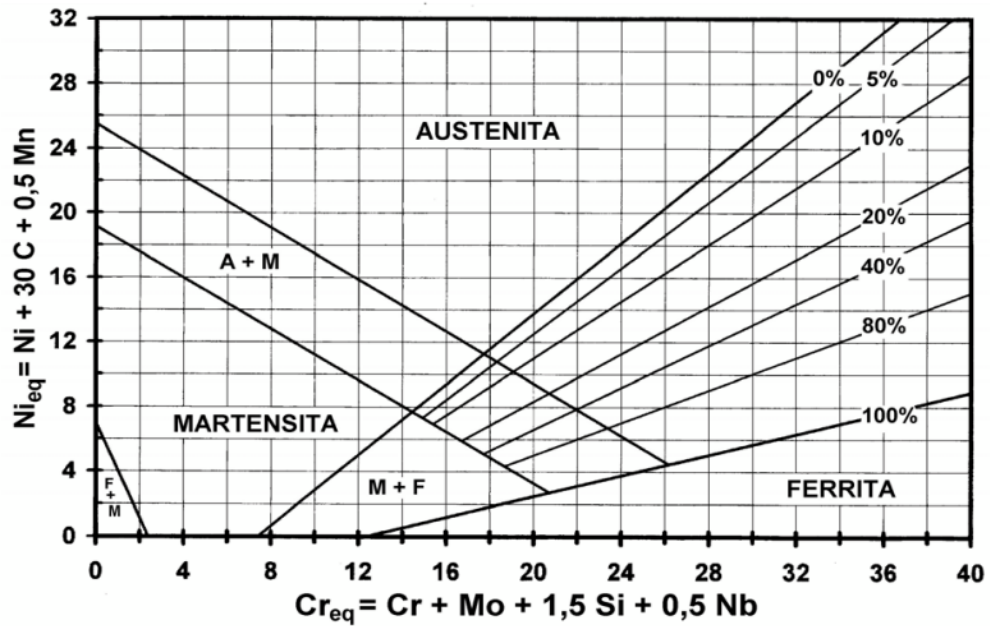
ABNT 304 - Composição química (%)						
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
0,08	2,00	1,00	0,045	0,03	17,50 a 20,00	8,00 a 10,50

Fonte: ABNT NBR 5601 (2011)

3.1.2 Metal de adição

A definição do metal de adição foi feita a partir da utilização do Diagrama de Schaeffler, Figura 22, buscando uma boa compatibilidade e evitar a formação de trincas a quente, as quais são mais preocupantes nos aços inoxidáveis austeníticos (ASM International, 1999).

Figura 22 – Diagrama de Schaeffler



Fonte: DEMEC (2015)

O metal de adição selecionado e utilizado foi uma bobina de arame AWS A5.9 ER317L com diâmetro de 1,2 mm, apresentado na Figura 23, cuja composição química está descrita na Tabela 3.

Figura 23 – Bobina de arame AWS A5.9 ER317L



Fonte: Própria da autora.

Tabela 3 – Composição química do metal de adição

AWS A5.9 ER317L - Composição química (%)					
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0,03	0,3	1,0	18,5	13,0	3,0

Fonte: Voestalpine by Böhler Welding.

3.1.3 Bancada de soldagem

A bancada de soldagem utilizada para realização das soldagens encontra-se no Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem da Universidade Federal do Ceará – LPTS/UFC e sua configuração está exposta na Figura 24.

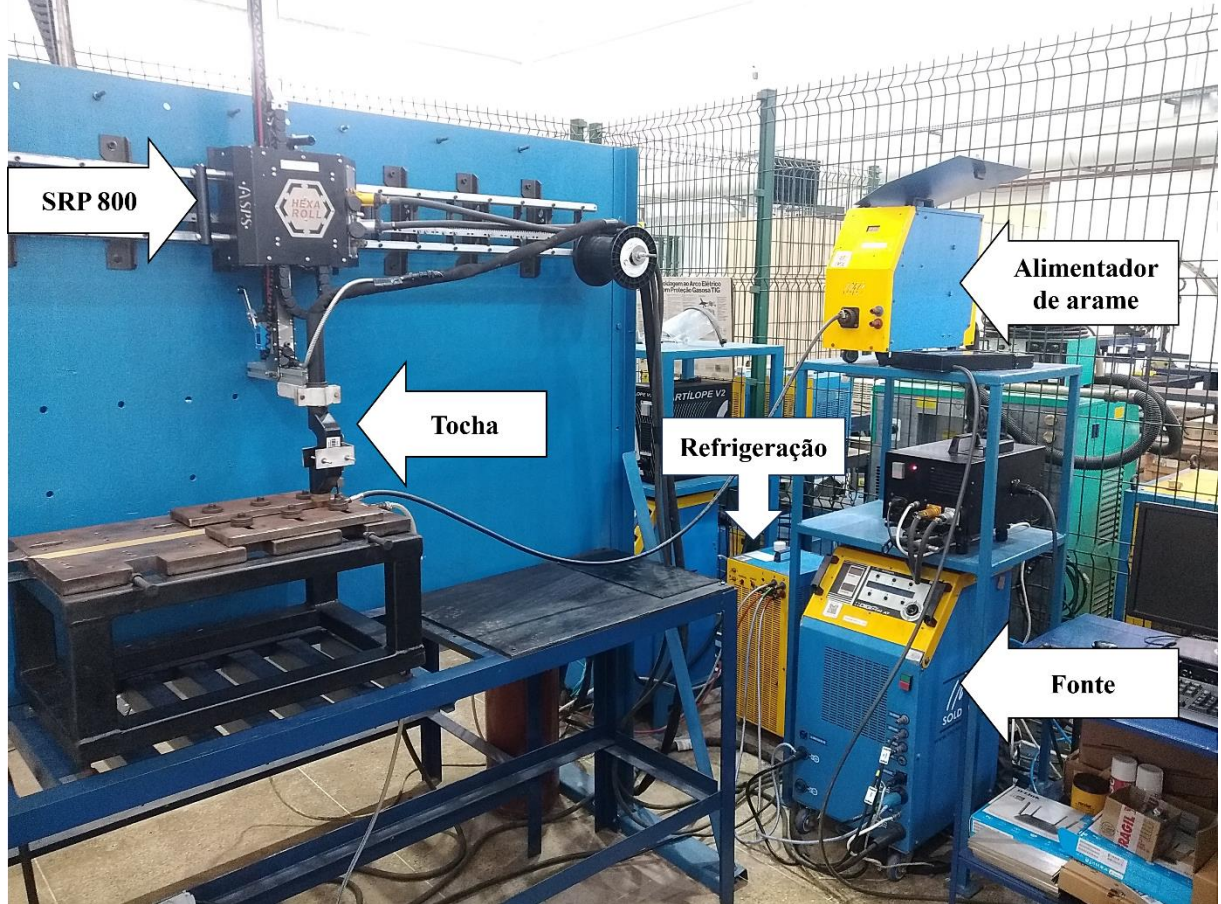
Figura 24 – Bancada de soldagem



Fonte: Elaborada pela autora.

A bancada é composta por uma fonte de soldagem IMC DigiPLUS A7 ACPO, uma tocha de soldagem a plasma automática PWM 300 Autogen-Ritter com um eletrodo de 4,8 mm de diâmetro de Tungstênio com 2% de Lantânio, uma unidade de refrigeração IMC UPR 2 e um alimentador de arame IMC STA, conforme Figura 25, com o bico de alimentação acoplado à tocha, conforme a Figura 26. A movimentação da tocha sobre a junta foi realizada através do sistema de movimentação de soldagem automática SPS SRP 800.

Figura 25 – Tocha de soldagem e sistema de movimentação, fonte de soldagem, alimentador de arame e refrigeração



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 26 – Alimentador acoplado à tocha de soldagem



Fonte: Elaborada pela autora.

A aquisição instantânea dos dados durante a soldagem foi feita através do sistema de supervisão e rastreabilidade de soldagem 3SR VP- DG Wi-Fi V1.8 e foram utilizados, também, três cilindros de gás de Argônio com 99,9% de pureza, o primeiro para o gás de plasma, o segundo como gás de proteção e o terceiro para realizar a purga da raiz. A Figura 27 ilustra a disposição desses componentes.

Figura 27 – Sistema de aquisição de dados e cilindros de gás



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 28 é possível observar o sistema para fixação da junta com canal para passagem do gás de purga.

Figura 28 – Placa para fixação da junta e purga de gás



Fonte: Elaborada pela autora.

O canal da placa, após toda a fixação e alinhamento da junta, é coberto para que o gás não se disperse e possa realmente cumprir a sua função.

3.2 Metodologia

Conforme o fluxograma (Figura 20) exibido anteriormente, as etapas descritas nessa seção serão: as soldagens, a retirada de amostras, a preparação metalográfica e as análises.

3.2.1 *Planejamento de soldagem*

A realização das soldagens seguiu a sequência de testes de soldagem, definição dos parâmetros para as soldagens definitivas e as soldagens definitivas, conforme fluxograma da Figura 20.

3.2.1.1 *Testes de soldagem*

Primeiramente, foram realizados testes autógenos com para compreender a faixa de operação do material em questão com cordões de aproximadamente 70 mm. Para isso, iniciou-

se os testes com a corrente de 100 A, definida como a corrente mínima para o processo *keyhole*, e foi sendo aumentada gradualmente. Em seguida, foram adicionados os testes com alimentação de arame. Durante os testes, foi realizado a aquisição de dados para cálculo da energia e na Tabela 4 estão descritos os testes realizados.

Tabela 4 – Condições de teste

Tipo	Corrente (A)	Energia de Soldagem (kJ/mm)	Velocidade de alimentação (cm/min)
Autógeno	100	0,27	-
Autógeno	110	0,30	-
Autógeno	120	0,34	-
Autógeno	130	0,37	-
Autógeno	140	0,42	-
Autógeno	150	0,45	-
Autógeno	160	0,50	-
Com adição	160	0,50	0,7
Com adição	160	0,50	1,4
Com adição	160	0,50	2,1
Autógeno	170	0,53	-
Autógeno	180	0,57	-
Autógeno	220	0,75	-
Autógeno	250	0,82	-
Com adição	250	0,82	1,5

Fonte: Elaborada pela autora.

Nos testes de soldagem, manteve-se constante a vazão do gás de plasma, sendo todas 5 l/min. Também se utilizou como base alguns dos parâmetros já consolidados em serviço desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem.

3.2.1.2 Soldagens definitivas

Após os testes foram definidas as faixas de variação dos parâmetros escolhidos no objetivo deste trabalho: a energia de soldagem, a velocidade de alimentação e a vazão do gás de plasma. Para analisar a influência desses parâmetros na geometria do cordão, a energia

(controlada por meio da corrente de soldagem) e a velocidade de alimentação foram variadas em 3 níveis e o gás de plasma foi variado nas condições intermediárias do primeiro e segundo níveis de energia, totalizando 15 condições de soldagem, como apresentado nas Tabela 5 Tabela 6.

Tabela 5 – Condições de soldagem variando energia de soldagem e velocidade de alimentação

Condição	Corrente (A)	Energia de Soldagem (kJ/mm)	Velocidade de alimentação (cm/min)
E1-A1	100	0,27	0,7
E1-A2	100	0,27	1,4
E1-A3	100	0,27	2,1
E2-A1	160	0,50	0,7
E2-A2	160	0,50	1,4
E2-A3	160	0,50	2,1
E3-A1	220	0,75	0,7
E3-A2	220	0,75	1,4
E3-A3	220	0,75	2,1

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 6 - Condições de soldagem variando energia de soldagem e vazão do gás de plasma

Condição	Corrente (A)	Energia de Soldagem (kJ/mm)	Velocidade de alimentação (cm/min)	Vazão do gás de plasma (l/min)
E2-A2-G1	160	0,50	1,4	2,5
E2-A2-G2	160	0,27	1,4	5,0
E2-A2-G3	160	0,50	1,4	7,5
E3-A2-G1	220	0,75	1,4	2,5
E3-A2-G2	220	0,75	1,4	5,0
E3-A2-G3	220	0,75	1,4	7,5

Fonte: Elaborada pela autora.

Os demais parâmetros do processo foram mantidos constantes e estão descritos na Tabela 7.

Tabela 7- Parâmetros de soldagem constantes.

Parâmetros de soldagem fixos	
Velocidade de Soldagem	60 cm/min
Ângulo de fiação do eletrodo	18°
Recuo do eletrodo (<i>Setback</i>)	3 mm
Distância tocha-peça	3 mm
Vazão do gás de proteção	16 l/min
Vazão do gás de purga	10 l/min

Fonte: Elaborado pela autora.

É válido salientar que, antes de cada soldagem, as chapas foram limpas com acetona para remoção de qualquer impureza presente na superfície das mesmas.

3.2.2 Retirada de amostras

Os tópicos a seguir descrevem as etapas para seleção das regiões e retirada de amostras.

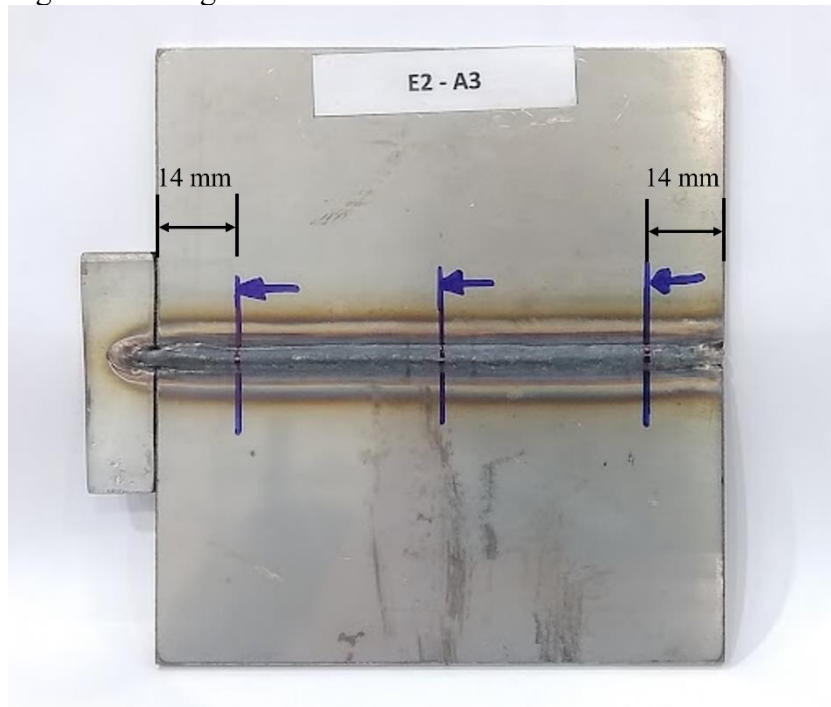
3.2.2.1 Análise da qualidade dos cordões

Após as soldagens, foi realizada a inspeção visual das juntas, para avaliar a qualidade e o acabamento dos cordões em cada condição, bem como a uniformidade e a presença de alguns defeitos. A partir dessa análise, foram definidas quais juntas seguiriam para o processo de corte.

3.2.2.2 Definição das regiões de análise e corte

Após a verificação dos cordões, foi adotado o padrão de retirar três amostras do trecho uniforme do cordão de solda, nas regiões do início, meio e fim de cada junta. Portanto, foram analisadas a geometria do cordão de solda através da seção transversal em 14 mm do início da chapa, outra a 14 mm do final e uma outra no meio dessas duas marcações, conforme ilustra a Figura 29.

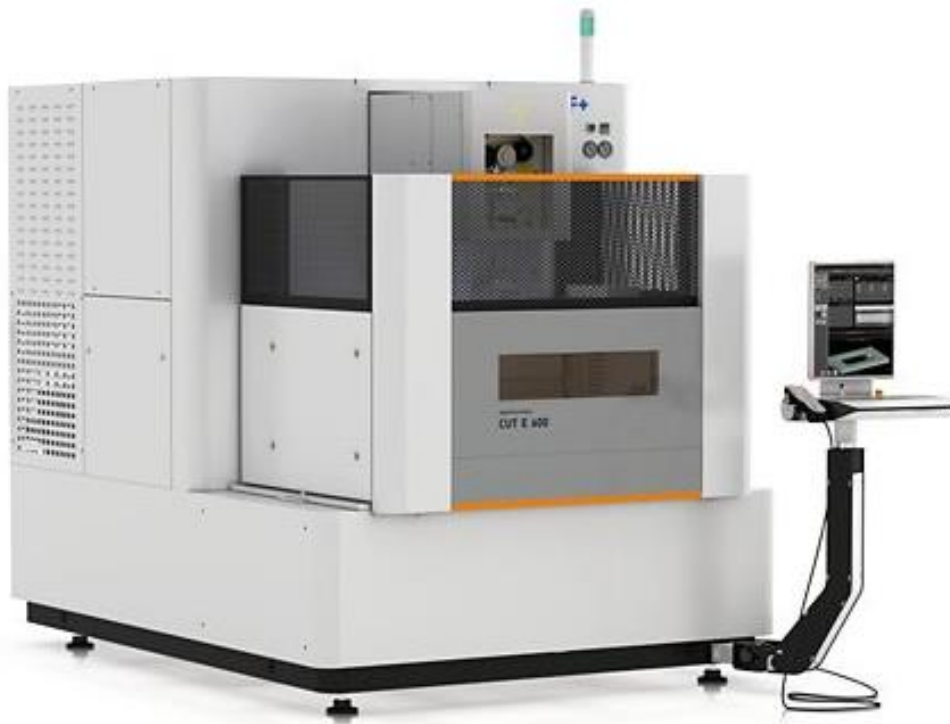
Figura 29 – Regiões de análise



Fonte: Elaborado pela autora.

Em seguida, as amostras foram levadas para corte em eletroerosão a fio na Eletroerosão AgieCharmilles CUT E 600, exibida na Figura 30.

Figura 30 – Eletroerosão AgieCharmilles CUT E 600



Fonte: GF Machining Solutions.

Na Figura 31 é possível observar uma junta após a retirada das amostras.

Figura 31 – Junta após retirada de amostras



Fonte: Elaborada pela autora.

3.2.3 Preparação metalográfica

Com o intuito de gerar uma superfície plana e com bom aspecto superficial, capaz de proporcionar uma boa visualização do cordão de solda, as amostras foram embutidas, com o auxílio da Embutidora Fortel Digital 30 (Figura 32), para evitar quaisquer abaulamentos ou outras modificações no perfil do cordão. Em seguida, foram lixadas utilizando as lixas d'água de 120, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh na politriz Struers LaboPol-25 (Figura 33) e polidas em alumina nº 4 (1 micron), utilizando pano de polimento em politriz de mesmo modelo.

Figura 32 – Embutidora



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 33 – Politriz Struers LaboPol-25



Fonte: Elaborada pela autora.

Após gerar uma superfície reflexiva, as amostras foram submetidas a ataque eletrolítico em solução de ácido oxálico, com concentração de 10%, sob tensão constante de 5

V durante 20 segundos. Depois da realização de todas as etapas, as amostras apresentaram o aspecto ilustrado na Figura 34.

Figura 34 – Amostra após finalização da preparação metalográfica



Fonte: Elaborada pela autora.

3.2.4 Análises

Após a etapa de preparação metalográfica e permitir uma melhor distinção entre a zona fundida e o metal base, as amostras seguiram para etapa de análise, onde foram realizadas as macrografias, as medições e as análises ANOVA e teste de Tukey.

3.2.4.1 Macrografia

Com o intuito de observar a presença de possíveis discontinuidades e registrar as imagens de cada amostra, com o auxílio do Estereomicroscópio Zeiss Discovery.V20, equipamento exibido na Figura 35, foram feitas imagens com uma magnificação de 10,2 vezes.

Figura 35 – Estereomicroscópio Zeiss Discovery.V20

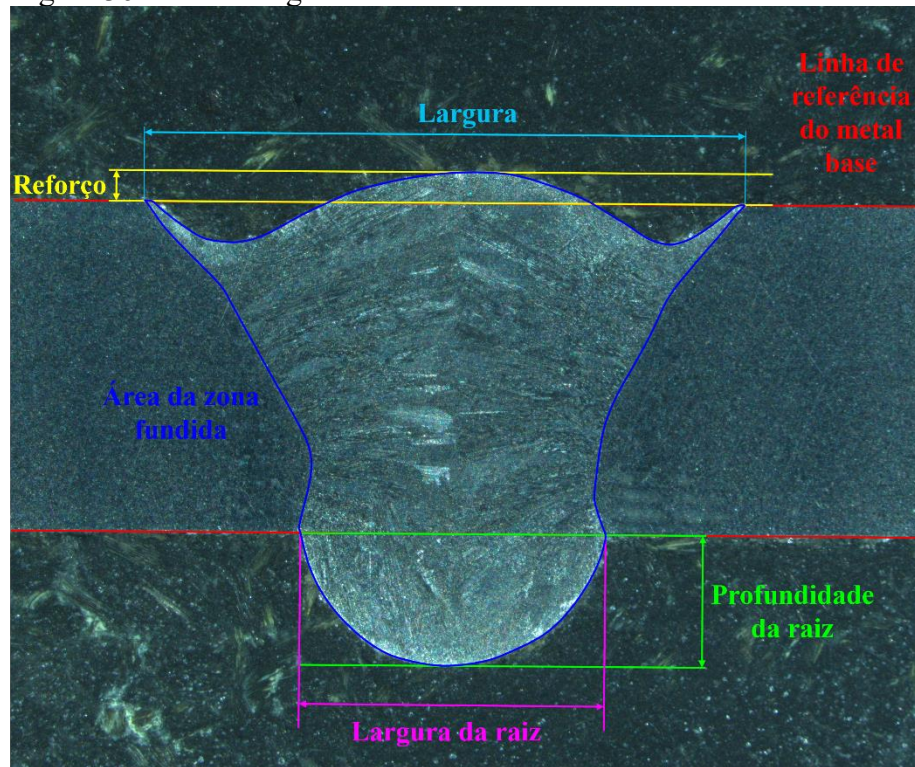


Fonte: Elaborada pela autora.

3.2.4.2 Medições

A fim de obter as medidas de geometria do cordão, utilizou-se as ferramentas de medição do software ZEN Core v2.7. Nele, todas as imagens registradas foram medidas a largura, reforço, penetração e área da zona fundida, seguindo o padrão ilustrado na Figura 36.

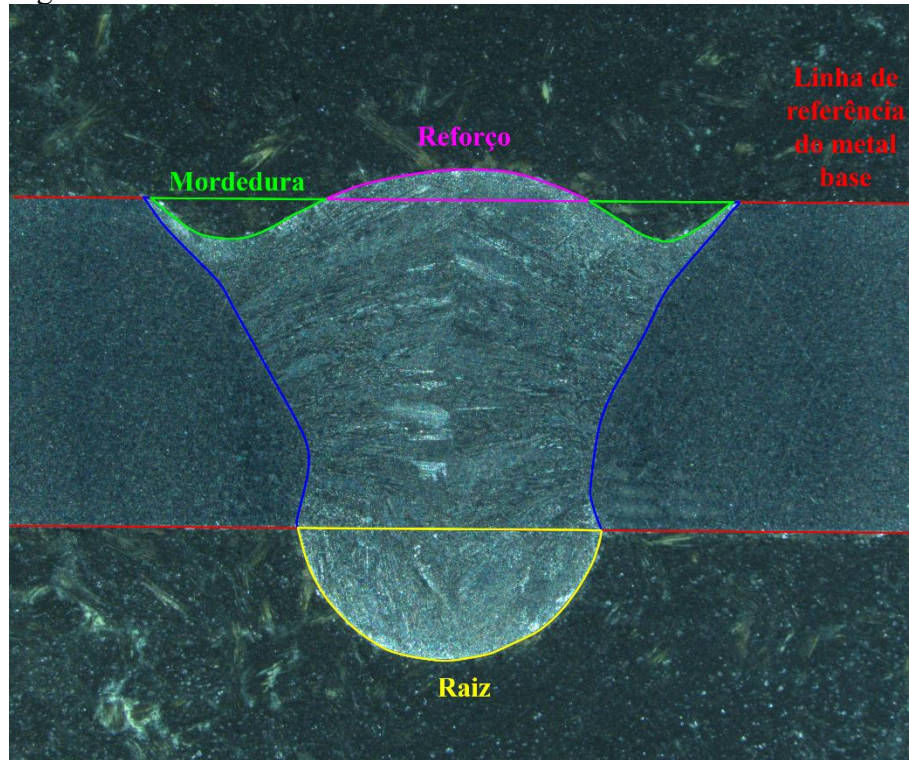
Figura 36 – Medidas geométricas do cordão de solda



Fonte: Elaborada pela autora.

Utilizando o mesmo software, foram realizadas, também, as medidas de área do reforço, da raiz, e das mordeduras, para as amostras que as apresentavam, conforme exemplifica a Figura 37.

Figura 37 – Medidas de área



Fonte: Elaborada pela autora.

Com essas medidas, foi realizado o cálculo da diluição, que representa a participação do metal de base na zona fundida, através da Equação 2. Onde, A_{ZF} é a área da zona fundida, A_m representa a soma das áreas das mordeduras, A_{Ref} é a área do reforço e A_{Raiz} representa a área da raiz.

$$D = \frac{A_{ZF} + A_m - A_{Ref} - A_{Raiz}}{A_{ZF}} \times 100 \quad (2)$$

3.2.4.3 ANOVA e teste de Tukey

Após a obtenção de todas as medidas anteriormente demonstradas, foi realizada a análise de variância (ANOVA) para cada grupo de variação de parâmetro, com o intuito de compreender a influência dos parâmetros de soldagem em cada medida geométrica dos cordões de solda produzidos neste estudo. O primeiro grupo contém as condições onde houve variação da energia de soldagem e da velocidade de alimentação, e no segundo, o grupo de juntas onde variou a energia de soldagem e a vazão do gás de plasma.

Dessa forma, com auxílio de software estatístico, foram feitas análises de variância de fatoriais fatores para os dois grupos em cada medida geométrica do cordão, analisando os fatores F e p. O fator F indica uma razão entre a variância entre os grupos e a variância dentro do grupo, e quanto mais próximo de 1, mais semelhantes são os grupos. Já o valor p indica a probabilidade de ocorrência do fator F, sendo que quando $p < 0,05$ a hipótese nula (não há diferenças significativas entre grupos) não pode ser aceita e há pelo menos uma condição estatisticamente diferente. Se o valor p for maior que 0,05, significa que a hipótese nula vale. Em caso de dois ou mais fatores, se a interação entre as variáveis for significativa ($p < 0,05$) esta análise sobrepõe à análise dos fatores isolados.

Em seguida, foi realizado o teste de Tukey para compreender se a diferença entre as médias é estatisticamente significante, ou seja, se, em um determinado intervalo de confiança, o valor em módulo da diferença das médias par a par é maior que a diferença mínima significativa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

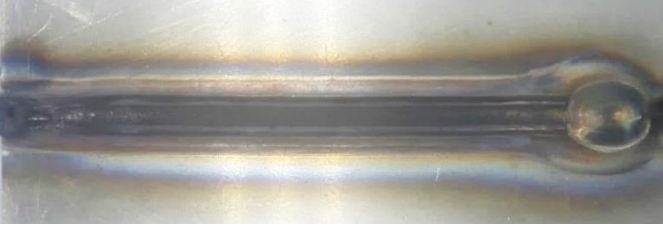



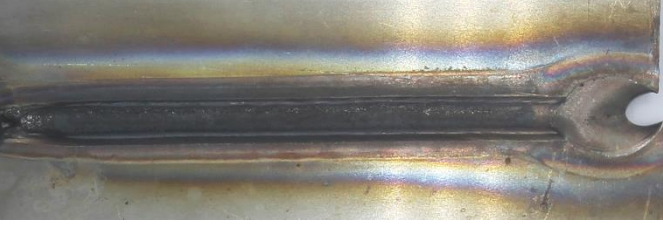



Neste tópico, serão apresentados os resultados e as discussões referentes a cada etapa de análise explicitada anteriormente.

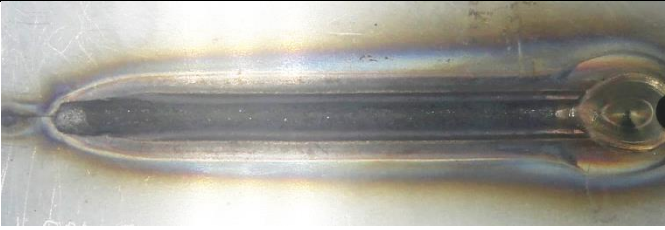
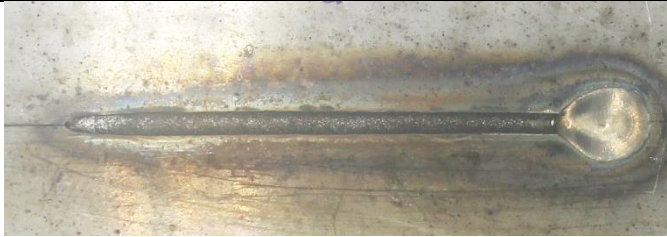
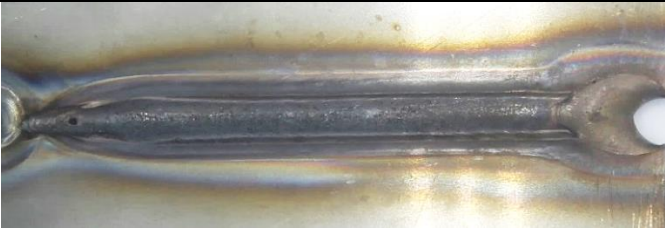

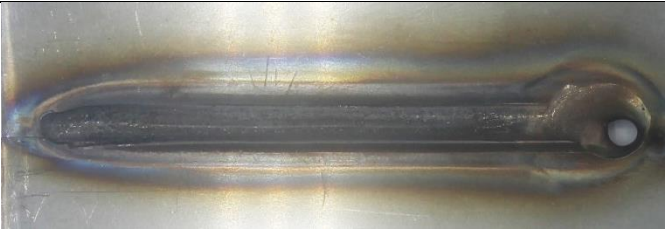


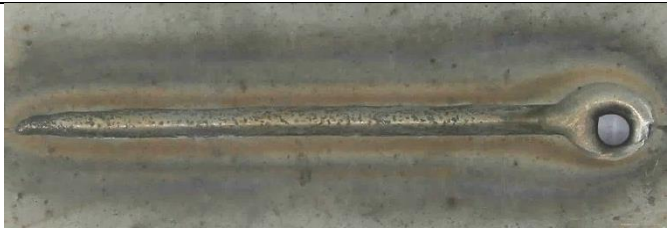
4.1 Testes de soldagem







Os testes de soldagem autógenos, iniciados a partir de 100 A e variados até 250 A, revelaram que a faixa operável para as condições adotadas era de 100 a 220 A, fornecendo também a faixa de energia de 0,27 a 0,75 kJ/mm. Como é possível observar na Figura 38, a maioria das soldagens, desde a menor energia, apresentaram um aspecto uniforme e de penetração total. No entanto, as condições com 130 e 250 A, 0,37 kJ/mm e 0,82 kJ/mm, apresentaram os defeitos de poros e *humping*, respectivamente.

Já os testes com alimentação de arame, apresentados no quadro da Figura 39, foi observado que, mesmo havendo deposição de material, a condição com energia de soldagem de 0,82 kJ/mm, apresentou furos, demonstrando não ser uma boa condição. e os testes com material de adição na energia intermediária, apresentaram-se uniformes.

Figura 38 – Quadro com soldagens de teste autógenas









Condição	Superfície	Raiz
100 A 0,27 kJ/mm		
110 A		
120 A		
130 A		

140 A		
150 A		
160 A		
170 A		

180 A		
220 A		
250 A		

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 39 – Quadro de testes de soldagem com adição de material

Condição	Superfície	Raiz
160 A 0,7 m/min		
160 A 1,4 m/min		
160 A 2,1 m/min		
250 A		

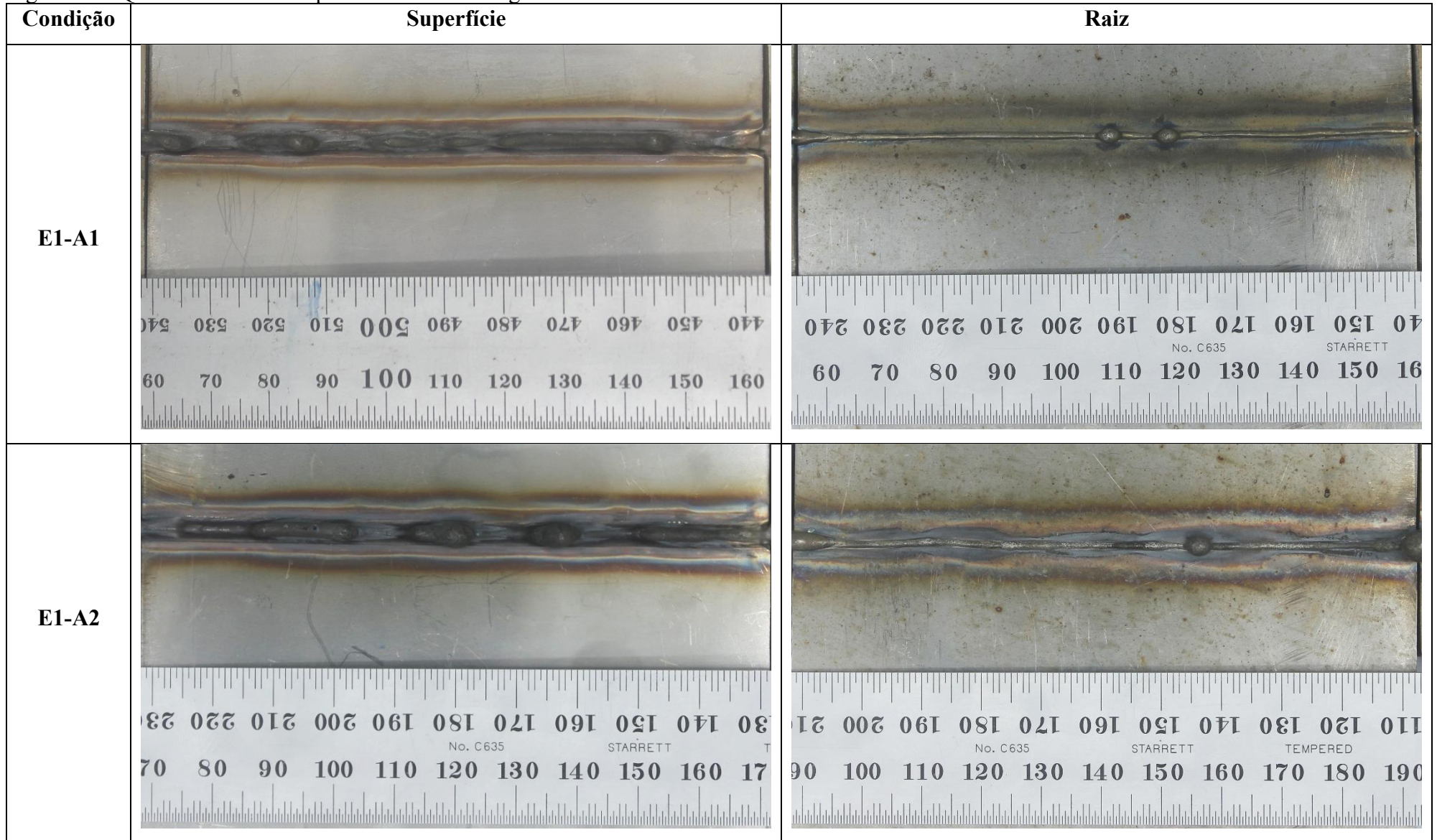
4.2 Análise da qualidade dos cordões das soldagens definitivas

Após a realização da soldagem de todas as condições e avaliação visual dos cordões de solda obtidos, foi possível observar que, como apresentado no quadro da Figura 40, as condições de menor energia apresentaram cordões com porosidades, protuberâncias na raiz, irregulares e, com a maior velocidade de alimentação, houve falta de penetração em alguns trechos. Indicando que a adição de material neste nível de energia de soldagem gerou instabilidades no processo e para a condição E1-A3 a energia foi insuficiente para fusão uniforme dos dois materiais.

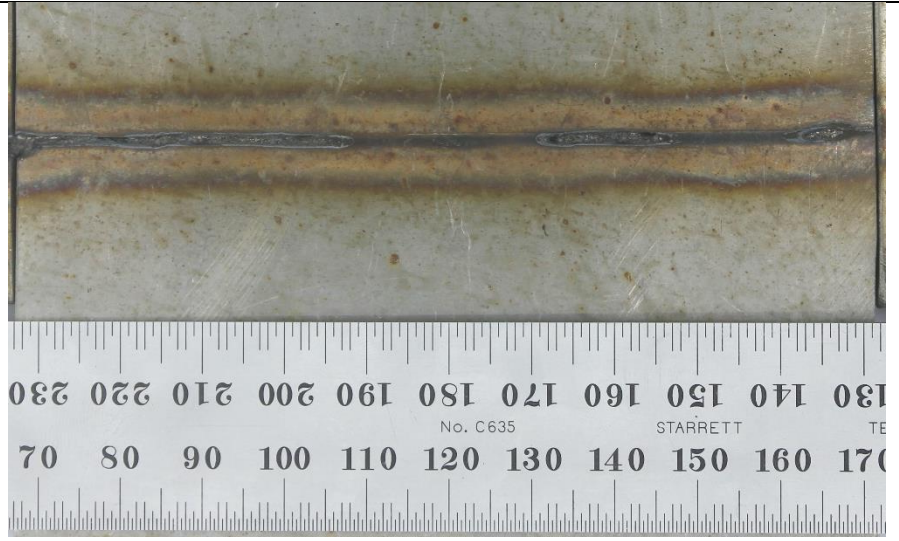
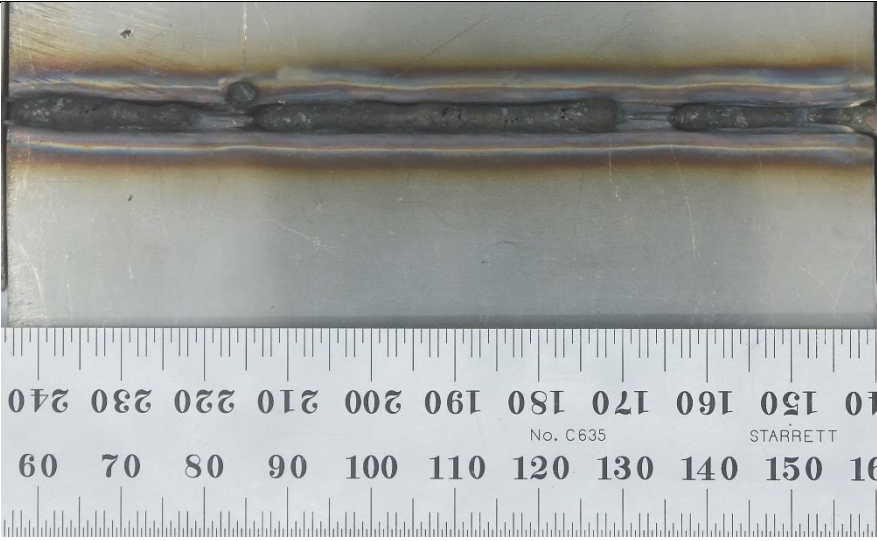
As demais condições produziram, em sua maioria, cordões constantes. No entanto, foi possível observar a presença de mordeduras em, pelo menos, um dos lados do cordão, não havendo ocorrência de mordeduras na raiz. Também foi possível notar que nas condições E2-A2-G1, E2-A2-G3 e E3-A2-G1 as mordeduras possuíam alguns pontos de maior profundidade, com aspecto similar à pequenos vazios.

A ocorrência de defeitos com esta característica ocorreu apenas nas condições de soldagem em que houve variação da vazão do gás, com exceção apenas da junta E3-A2-G3 (maior energia de soldagem e vazão de gás de plasma). Além disso, foi observado durante o processo de soldagem que na junta E3-A2-G1, o arco apresentou instabilidades ao longo do trecho soldado.

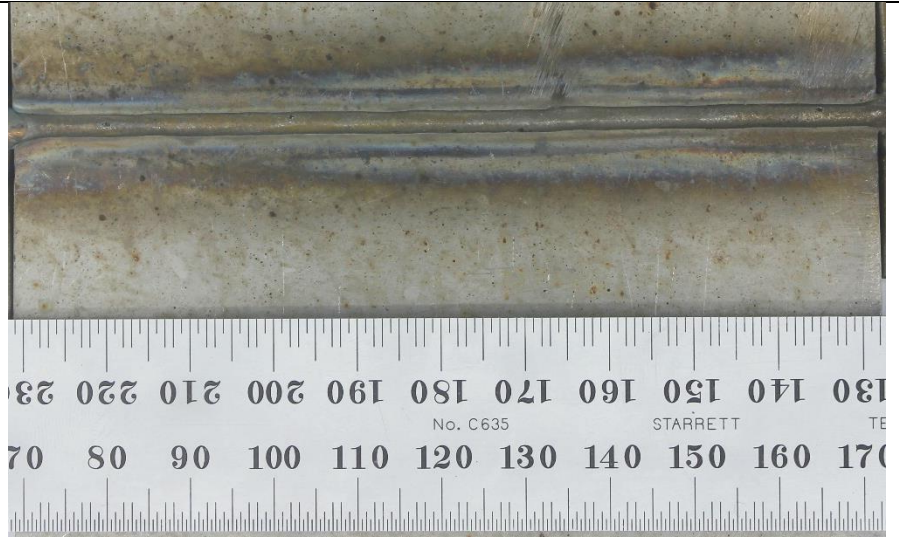
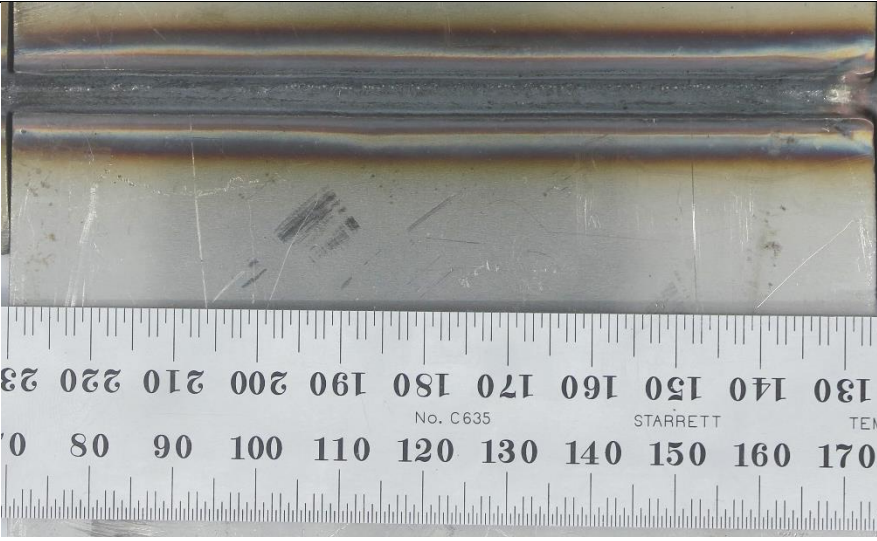
Figura 40 – Quadro com cordões produzidos nas soldagens definitivas

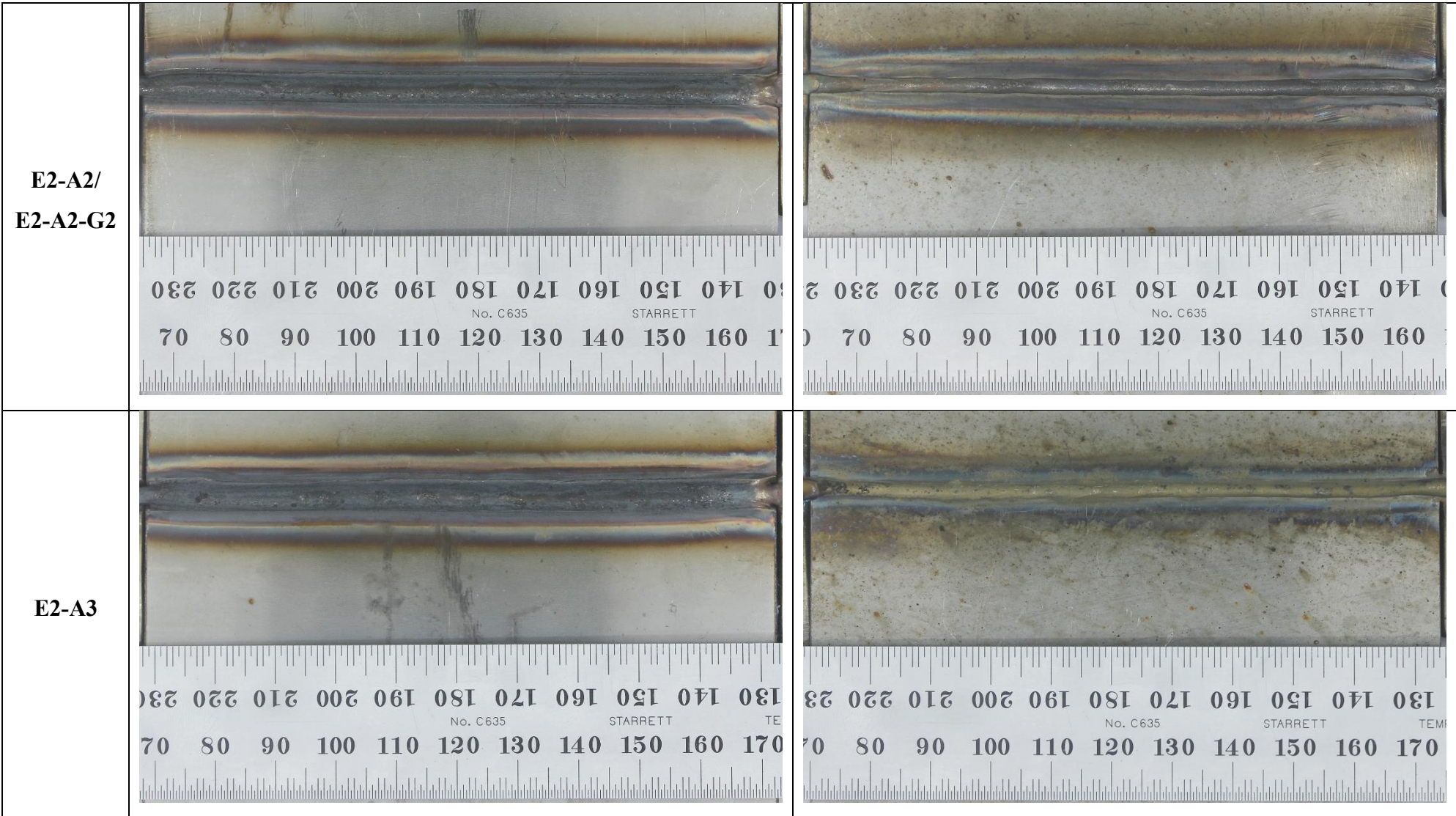


E1-A3

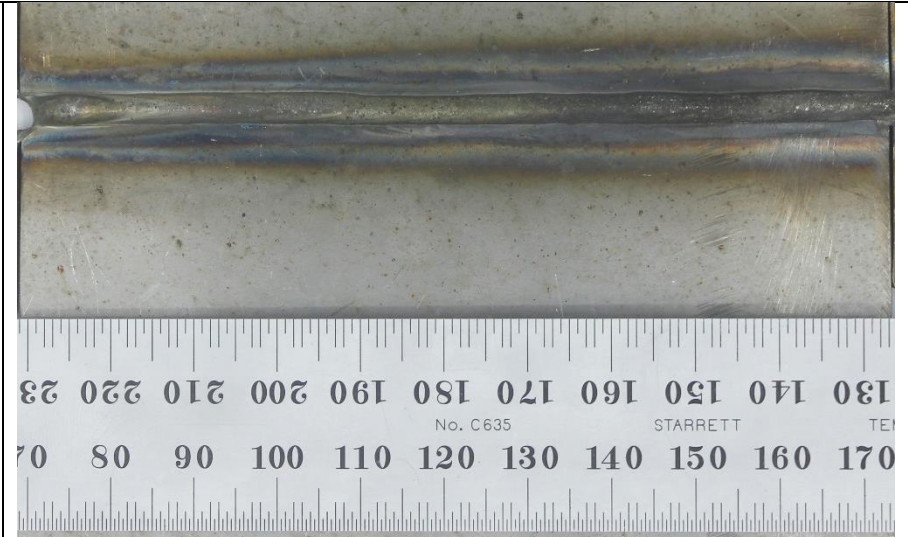
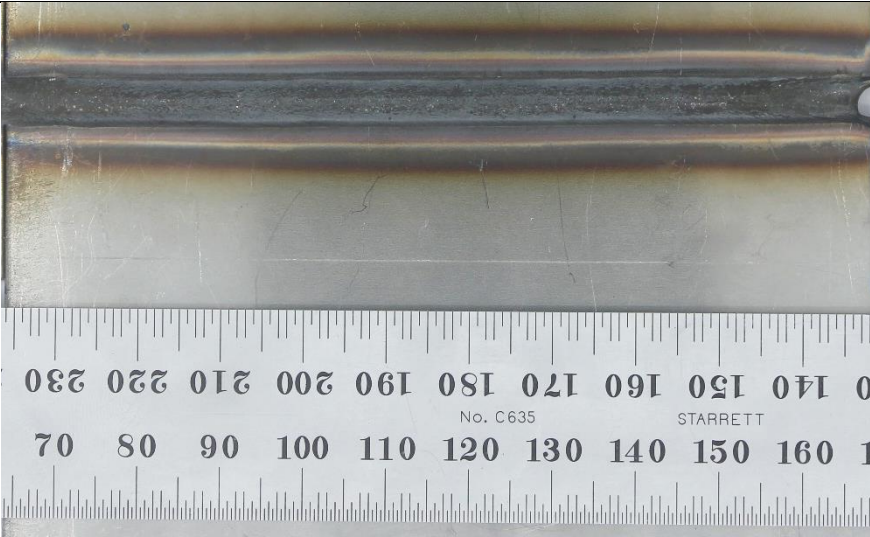


E2-A1

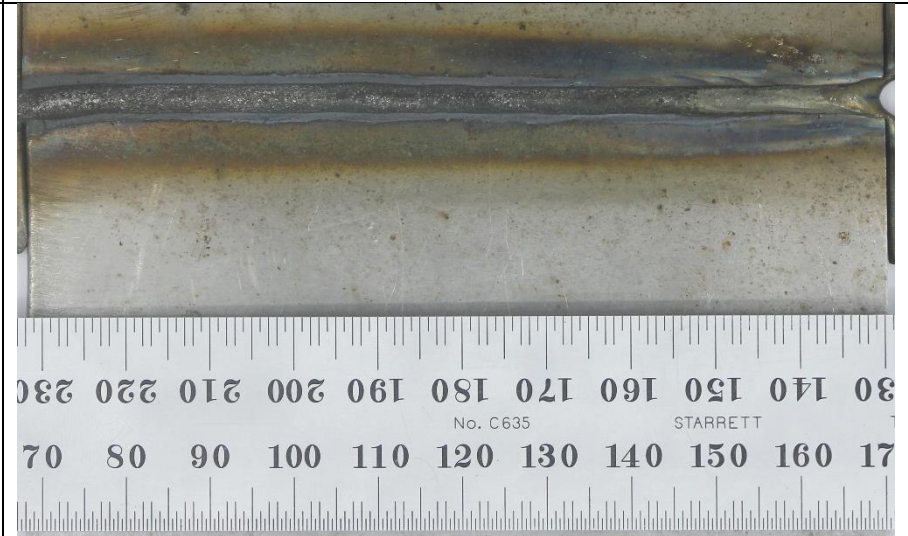
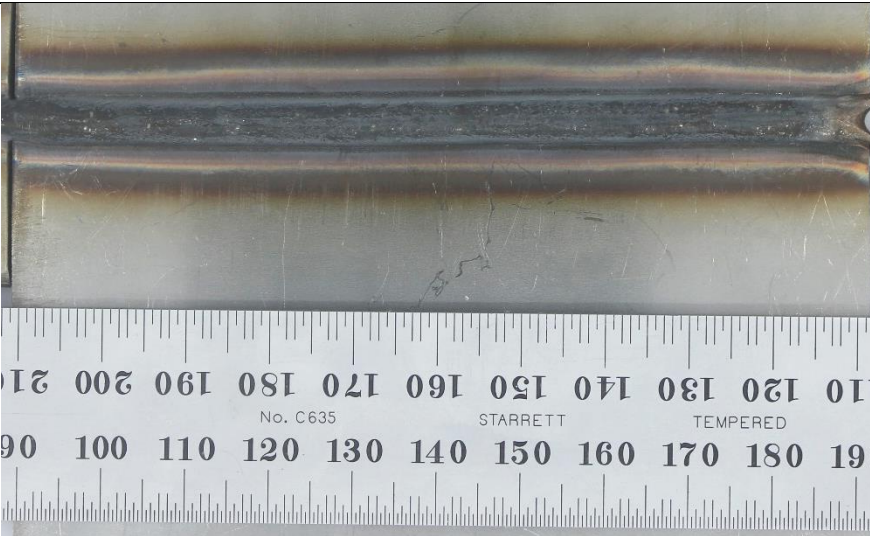




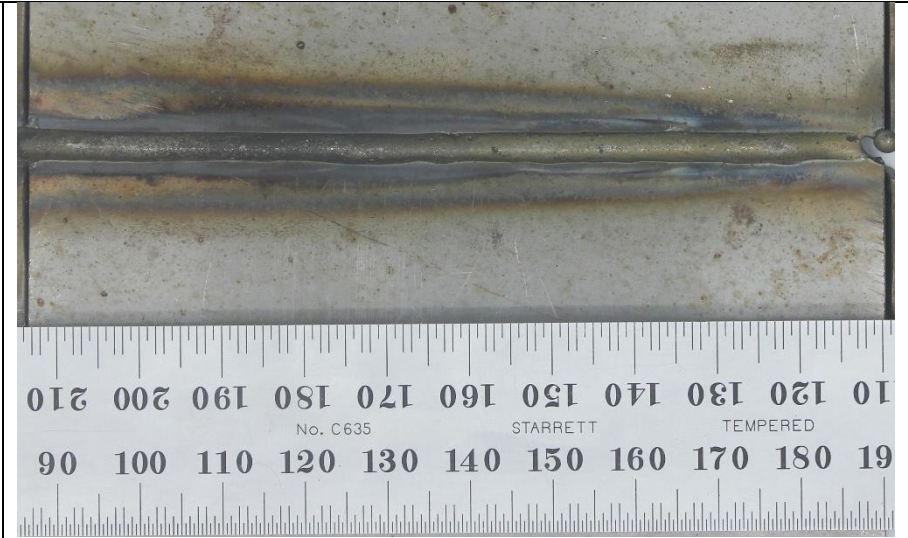
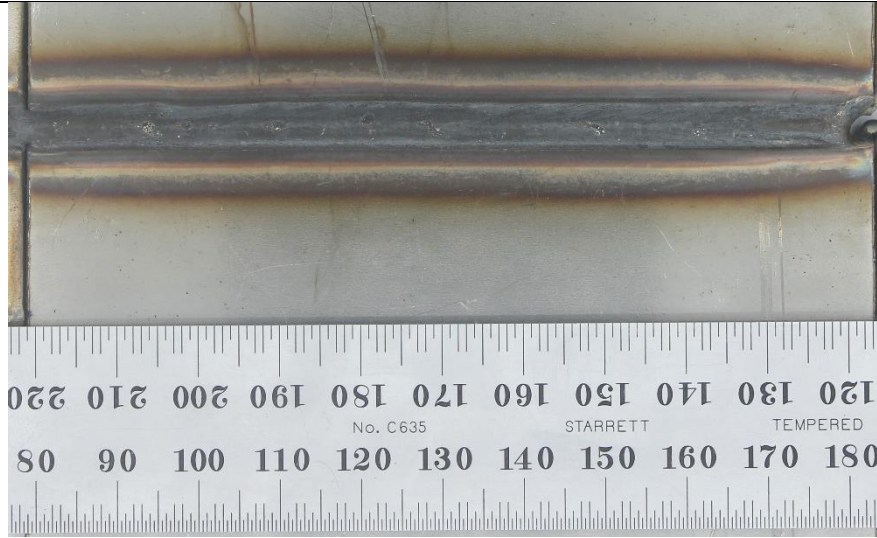
E3-A1



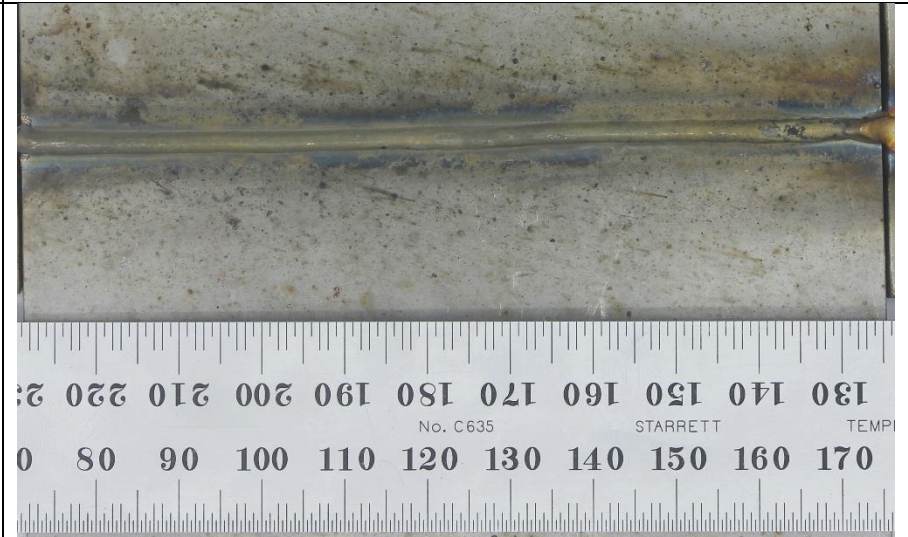
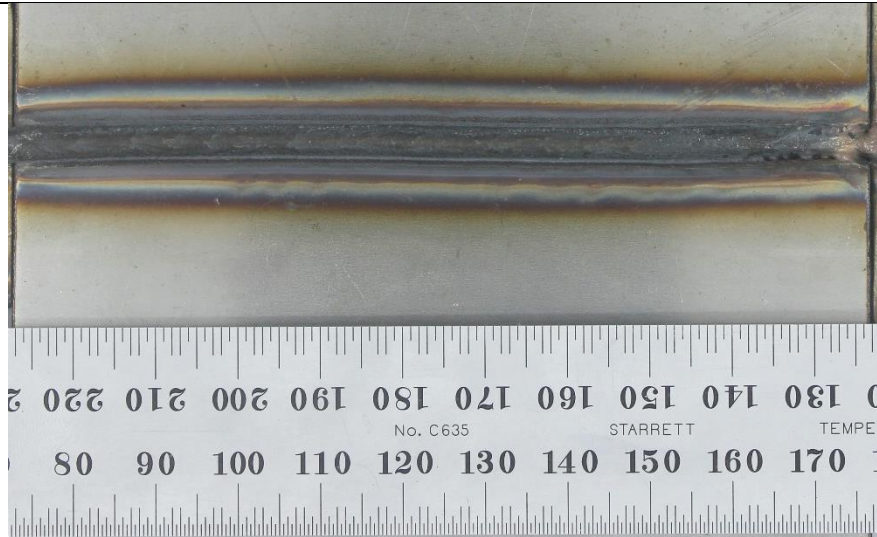
**E3-A2/
E3-A2-G2**



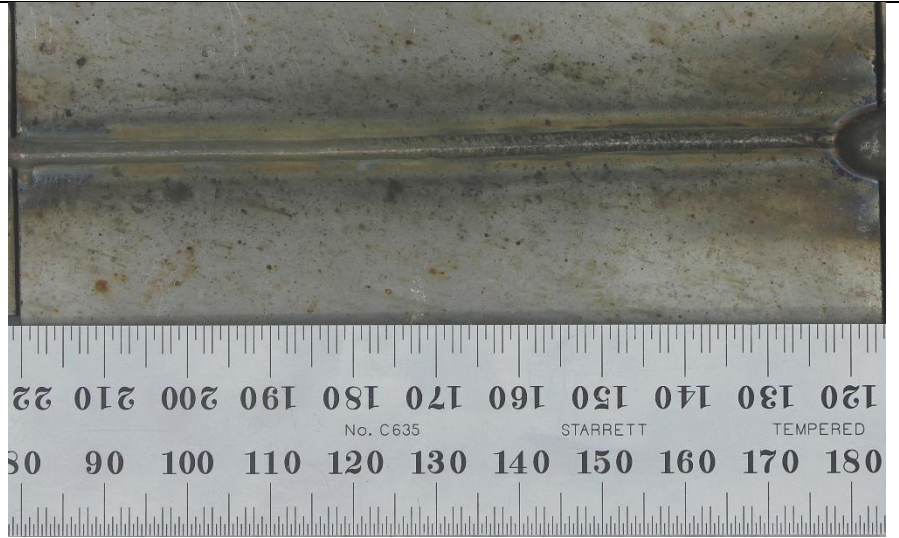
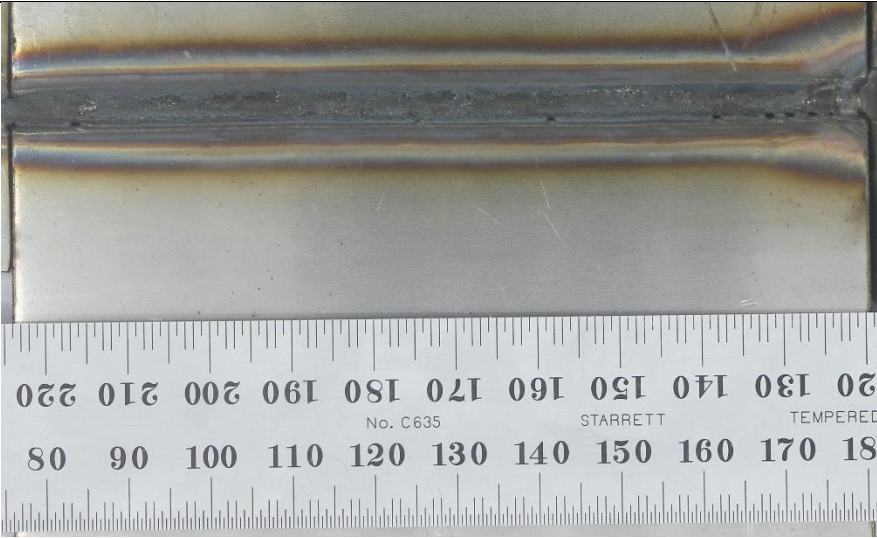
E3-A3



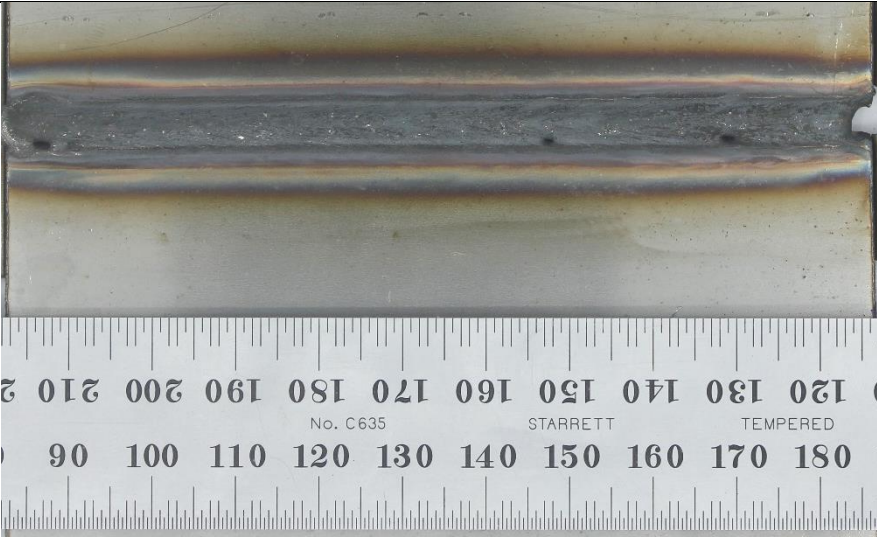
E2-A2-G1

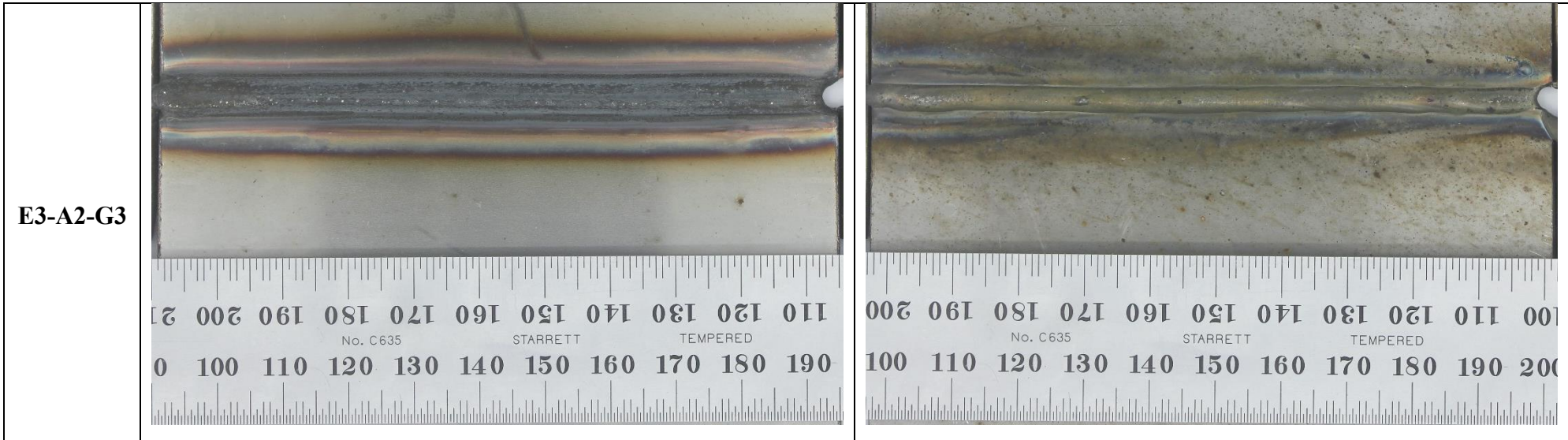


E2-A2-G3



E3-A2-G1



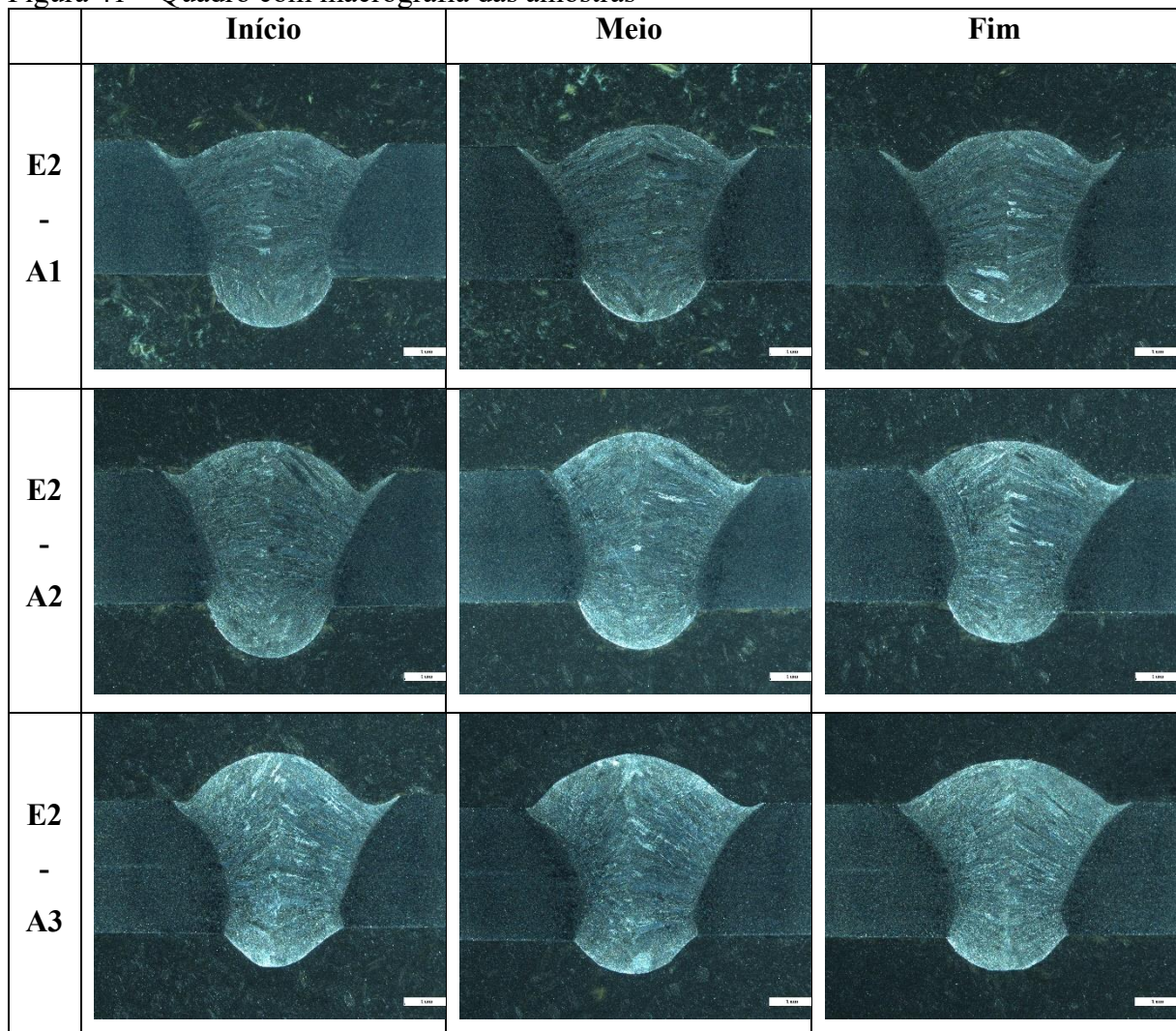


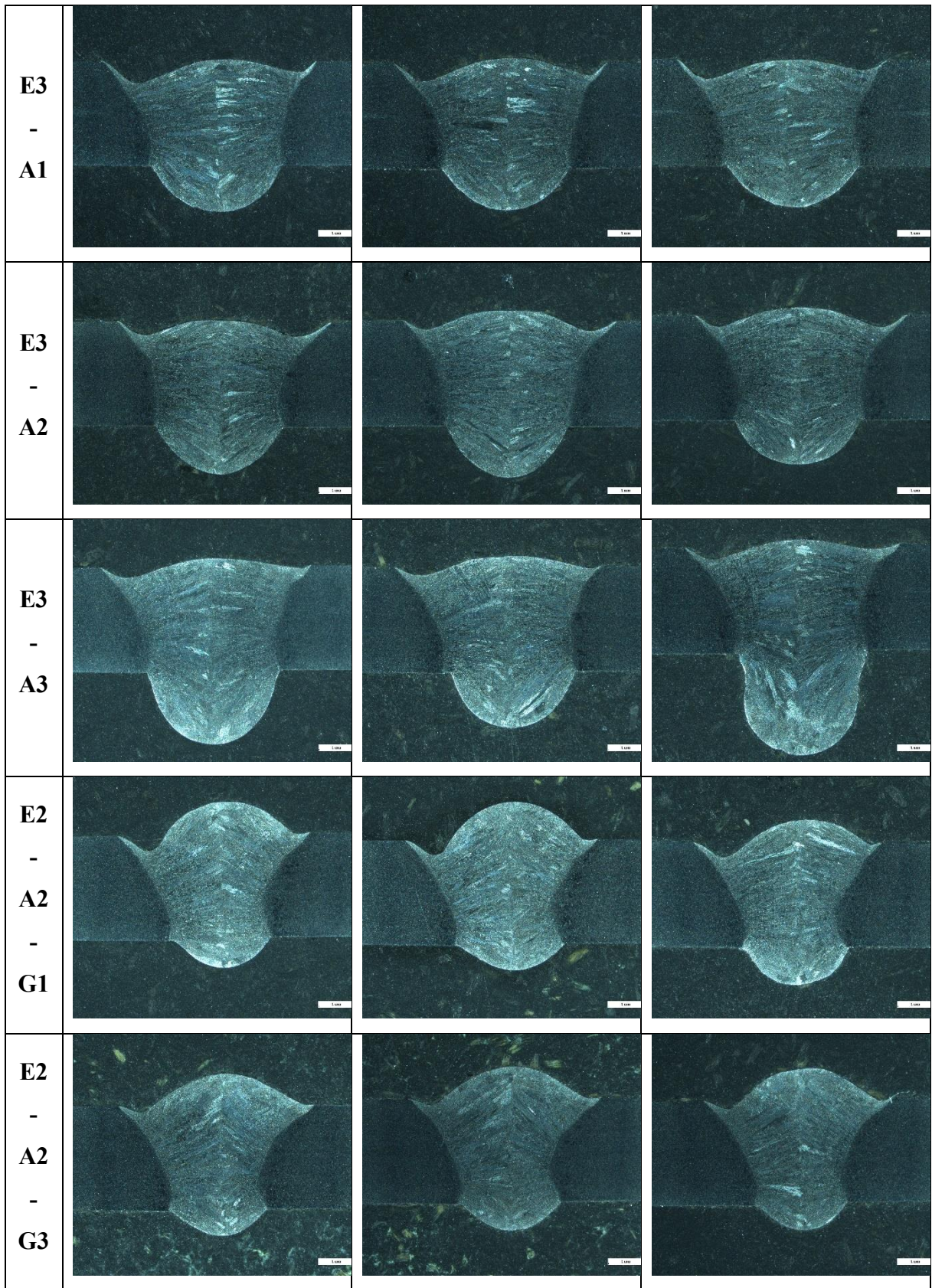
Fonte: Elaborado pela autora.

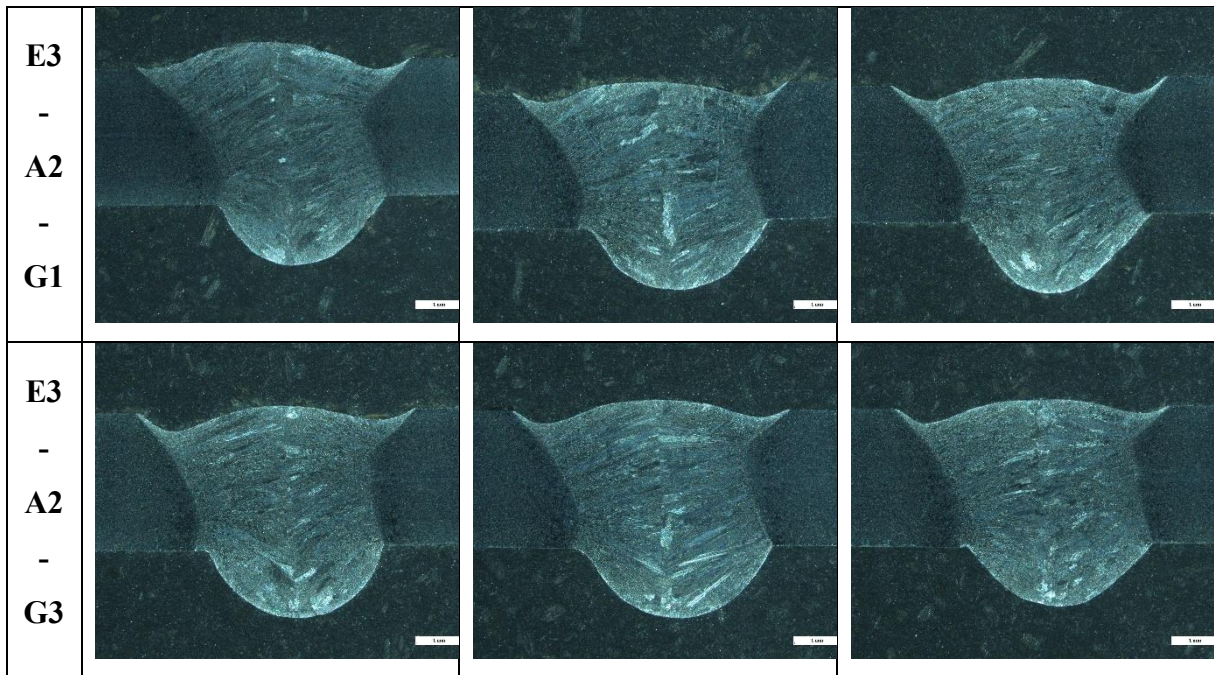
4.3 Macrografias

Com as imagens geradas através das macrografias, foi possível notar que, nas amostras retiradas, não houve a presença de defeitos internos, mas, corroborando com a análise anterior, observou-se a presença de mordeduras na superfície do cordão em um dos lados ou em ambos, não sendo notada a ocorrência na raiz. É notável também que a maior parte das condições apresentou um reforço pequeno e uma raiz com penetração excessiva.

Figura 41 – Quadro com macrografia das amostras







Fonte: Elaborado pela autora.

Como observado, houve a presença de mordeduras em todas as amostras, independente dos parâmetros variados nesse estudo, deste modo, acredita-se que a ocorrência das mesmas pode estar associada a outros fatores. De acordo com Richetti (1998, 2003), a presença de mordeduras pode estar associada a velocidades de soldagem elevadas, um desnível das juntas superior a 5% da espessura das chapas, ao desalinhamento da tocha com a junta ou se as mesmas não forem ortogonais.

Com as medidas realizadas, foi possível observar que a maioria das juntas onde houve algum desnível, a mordedura mais profunda encontrava-se no lado mais baixo, indicando que o arco provavelmente acoplou mais à chapa elevada. No entanto, também houveram condições onde a chapa mais alta apresentou a mordedura de maior profundidade ou as chapas com desnível praticamente desprezível apresentaram mordeduras de tamanhos distintos, isso pode indicar um pequeno desalinhamento da tocha em relação a junta ou interferência de outro fator, como a própria velocidade de soldagem.

4.4 Análise geométrica dos cordões de solda

Conforme explicitado na metodologia deste trabalho, a análise ANOVA e o teste de Tukey foram realizados em dois grupos. Deste modo, serão apresentados os resultados para a análise da influência dos parâmetros de soldagem nas condições onde houve variação da energia

de soldagem e da velocidade de alimentação, e, em seguida, os resultados das condições onde houve variação da energia de soldagem e da vazão do gás de plasma.

4.4.1 Efeito da energia de soldagem e velocidade de alimentação

4.4.1.1 Largura

Observando a média das três medidas realizadas em cada junta onde foram variadas a energia de soldagem e a velocidade de alimentação, disponível na Tabela 8, é possível notar que há uma tendência de aumento da largura dos cordões com o aumento da energia de soldagem. Já com o aumento da velocidade de alimentação, não é possível observar uma tendência clara de aumento ou redução.

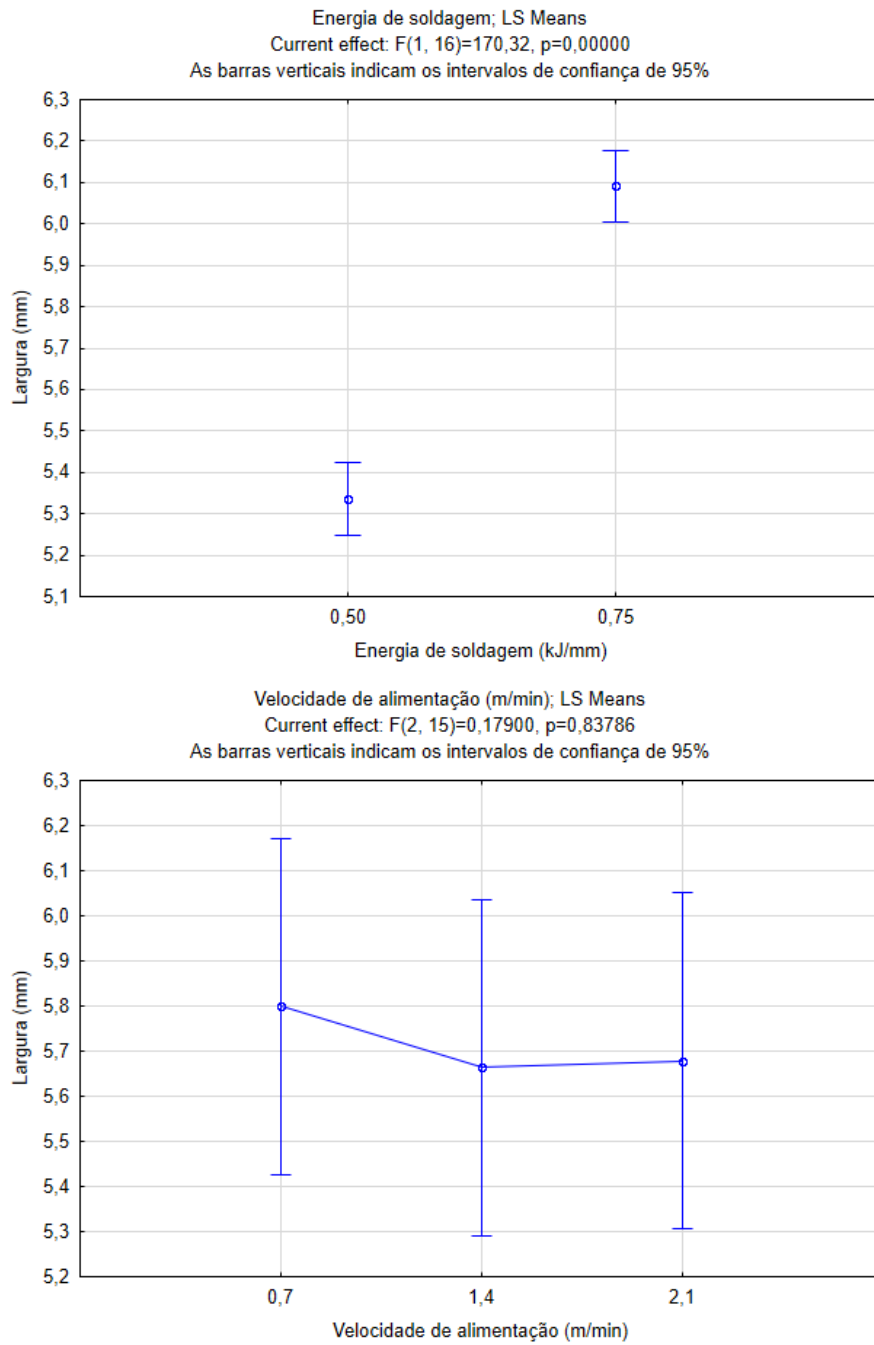
Tabela 8 – Largura dos cordões para análise variando energia de soldagem e velocidade de alimentação

Condição	Largura (mm)				
	Início	Meio	Fim	Média	Desvio padrão
E2-A1	5,480	5,473	5,507	5,487	0,018
E2-A2	5,341	5,113	5,182	5,212	0,117
E2-A3	5,181	5,465	5,279	5,308	0,144
E3-A1	6,208	6,115	6,009	6,111	0,100
E3-A2	6,172	6,109	6,069	6,117	0,052
E3-A3	6,072	5,934	6,137	6,048	0,104

Fonte: Elaborada pela autora.

Inserindo as medidas em software estatístico, foram gerados os gráficos da Figura 42 e as Tabela 9 e Tabela 10, análise de variância (ANOVA) e teste Tukey, respectivamente. Na ANOVA, os valores obtidos para a energia de soldagem foram $F > 1$ e $p < 0,05$, indicando que a energia gera pelo menos uma condição com estatisticamente diferente. Já a velocidade de alimentação tem os coeficientes $F < 1$ e $p > 0,05$, indicando que a hipótese nula é aceita e as médias não apresentam valores estatisticamente distintos.

Figura 42 – Gráficos com a influência da energia de soldagem e velocidade de alimentação na largura dos cordões



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 9 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da energia de soldagem na largura

Energia de soldagem (kJ/mm)	Largura (mm)	A	B
0,50	5,335667	****	
0,75	6,091667		****

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 10 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da velocidade de alimentação na largura

Velocidade de alimentação (m/min)	Largura (mm)	A
1,4	5,664333	****
2,1	5,678000	****
0,7	5,798667	****

Fonte: Elaborada pela autora.

Com o teste de Tukey, as condições com mesma letra não diferem estatisticamente e com letras distintas há diferença estatística. Logo, pela Tabela 9 e Tabela 10, apenas a energia de soldagem foi capaz de produzir médias com diferença significativa.

4.4.1.2 Reforço

Diferente da medida anterior, é possível observar nos valores de média expostos na Tabela 11, que ao aumentar a energia de soldagem (para a mesma velocidade de alimentação) houve uma redução do reforço, que deve estar associado ao aumento da pressão exercida pelo arco. Já com o aumento da velocidade de alimentação (para uma mesma energia) observa-se uma tendência de aumento do reforço.

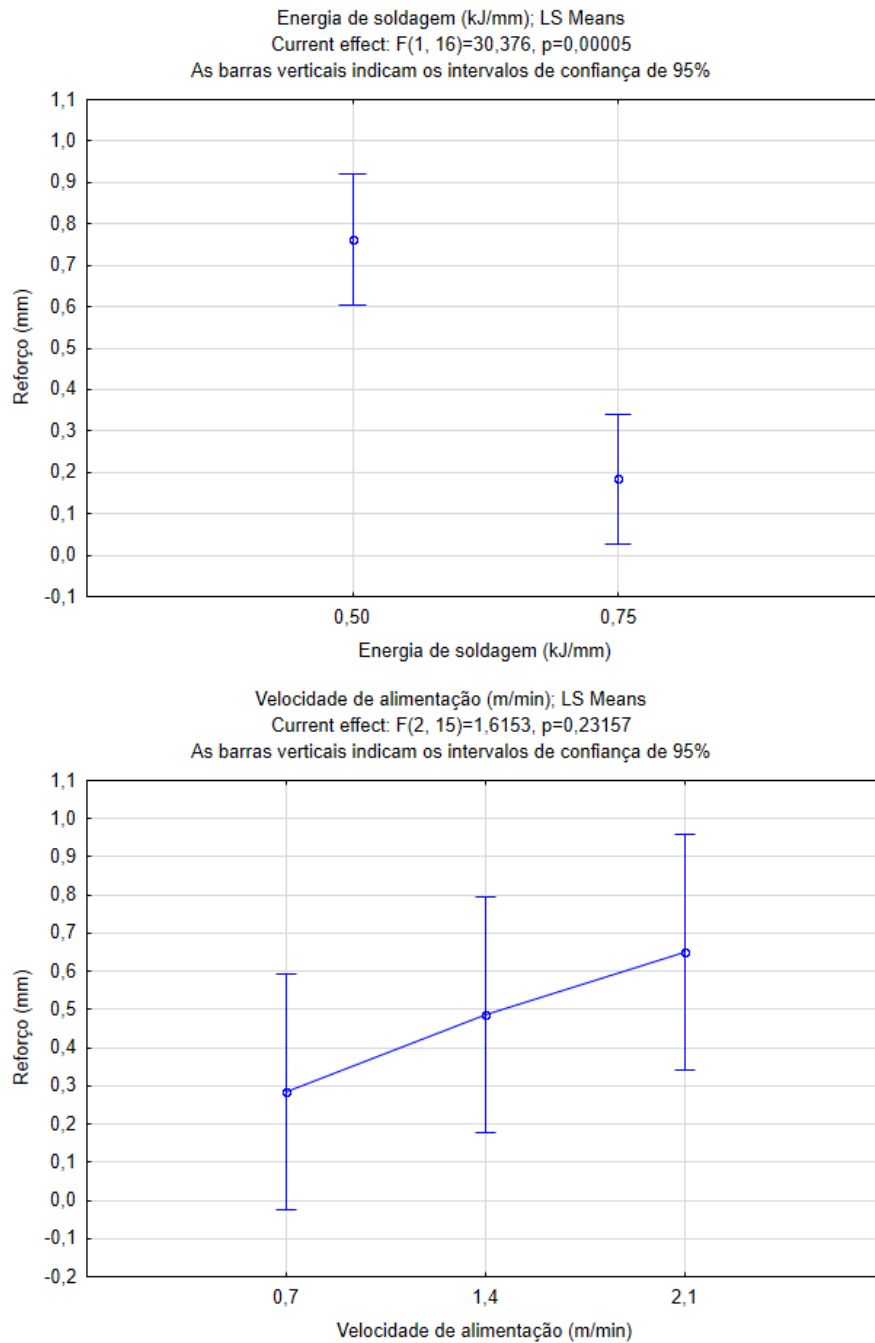
Tabela 11 – Reforço dos cordões para análise variando energia de soldagem e velocidade de alimentação

Condição	Reforço (mm)				
	Início	Meio	Fim	Média	Desvio padrão
E2-A1	0,280	0,518	0,482	0,427	0,128
E2-A2	0,693	0,927	0,758	0,793	0,121
E2-A3	1,048	1,166	0,994	1,069	0,088
E3-A1	0,270	0,148	0	0,139	0,135
E3-A2	0,034	0,287	0,223	0,181	0,132
E3-A3	0,221	0,301	0,175	0,232	0,064

Fonte: Elaborada pela autora.

Com a análise de variância é possível confirmar o efeito notado com os valores de média. A energia de soldagem, com o valor $F = 30,376$ ($F \gg 1$) e valor de $p = 0,0005$ ($p \ll 0,05$), produziu medidas estatisticamente diferentes, tendo um efeito de redução na medida do reforço. Para a velocidade de alimentação, com $F = 1,6153$ e $p = 0,2316$, a hipótese nula é aceita. No entanto, é notória uma tendência de aumento do reforço à medida que a velocidade de alimentação é acrescida. Na Figura 43, estão exibidos os gráficos resultantes da análise estatística.

Figura 43 – Gráficos com influência da energia de soldagem e velocidade de alimentação no reforço



Fonte: Elaborado pela autora.

Complementando a análise com o teste de Tukey, apresentado na Tabela 12 e Tabela 13, nota-se que a energia de soldagem gera médias com diferenças significativas, mas a velocidade de alimentação não.

Tabela 12 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência energia de soldagem no reforço

Energia de soldagem (kJ/mm)	Reforço (mm)	A	B
0,75	0,184333	****	
0,50	0,762889		****

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 13 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da velocidade de alimentação no reforço

Velocidade de alimentação (m/min)	Reforço (mm)	A
0,7	0,283000	****
1,4	0,487000	****
2,1	0,650833	****

Fonte: Elaborada pela autora.

4.4.1.3 Largura da raiz

Analisando os dados da Tabela 14, o aumento da energia de soldagem gerou um aumento dos valores médios de largura da raiz, já que, conforme exposto anteriormente, maiores energias de soldagens provocam um aumento da penetração. Por outro lado, a velocidade de alimentação não gerou um padrão de comportamento nesse parâmetro.

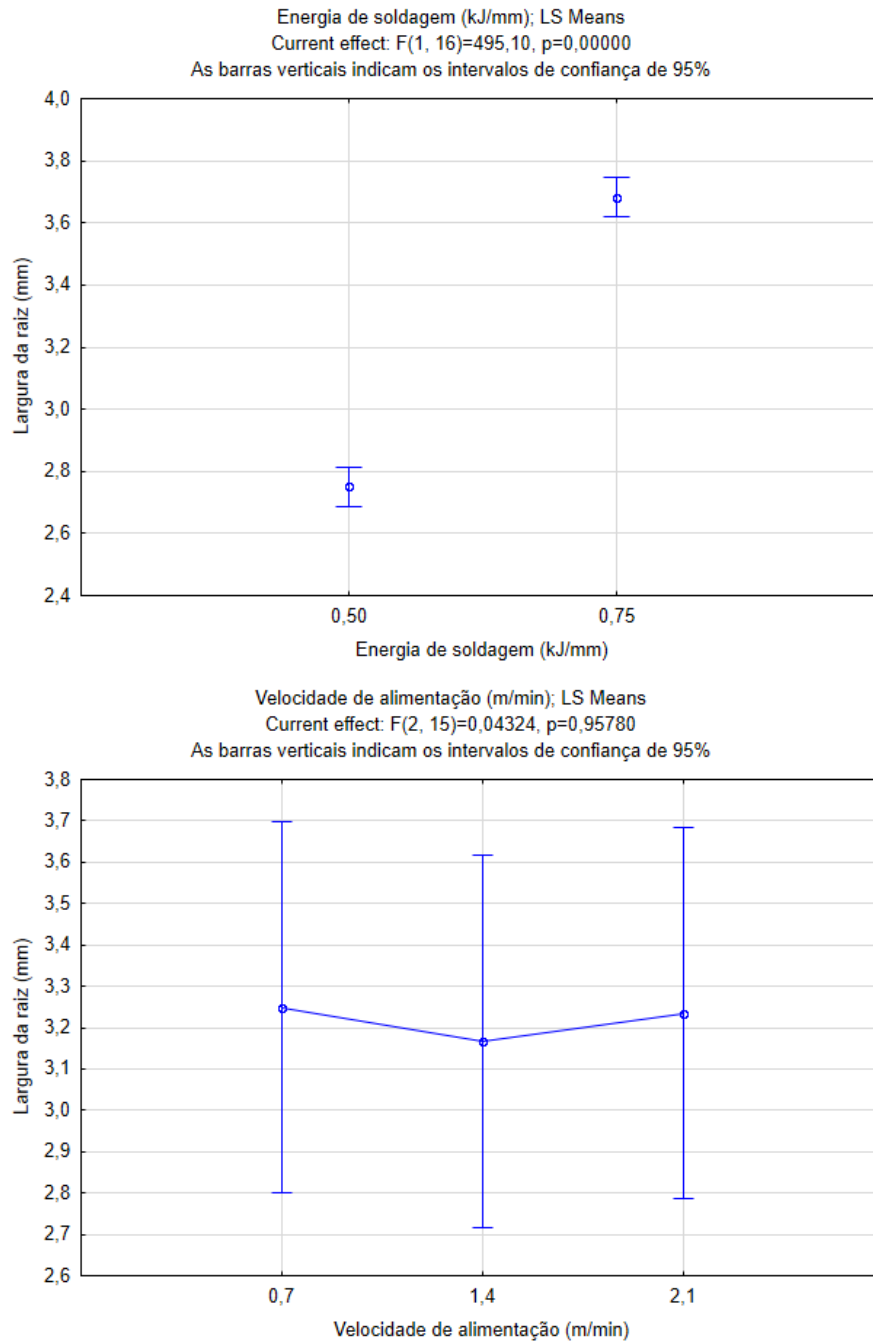
Tabela 14 – Largura da raiz dos cordões para análise variando energia de soldagem e velocidade de alimentação

Condição	Largura da raiz (mm)				
	Início	Meio	Fim	Média	Desvio padrão
E2-A1	2,782	2,748	2,726	2,752	0,028
E2-A2	2,827	2,746	2,637	2,737	0,095
E2-A3	2,757	2,818	2,720	2,765	0,049
E3-A1	3,763	3,665	3,808	3,745	0,073
E3-A2	3,668	3,477	3,646	3,597	0,105
E3-A3	3,843	3,592	3,681	3,705	0,127

Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com a ANOVA, como observa-se na Figura 44, a análise para a energia de soldagem apresentou os valores de $F = 495,10$ e fator $p < 0,05$, sendo capaz de produzir diferenças significativas e tendo um efeito de aumento na largura da raiz. Já a velocidade de alimentação, $F < 1$ e $p > 0,05$, não tem diferença relevante nos valores de média.

Figura 44 – Gráficos com a influência da velocidade de alimentação e energia de soldagem na largura da raiz dos cordões



Fonte: Elaborado pela autora.

Colaborando com esta análise, o teste de Tukey da Tabela 15 e Tabela 16, mostra que apenas a energia gera médias estatisticamente distintas.

Tabela 15 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência energia de soldagem na largura da raiz

Energia de soldagem (kJ/mm)	Largura da raiz (mm)	A	B
0,50	2,751222	****	
0,75	3,682556		****

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 16 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da velocidade de alimentação na largura da raiz

Velocidade de alimentação (m/min)	Largura da raiz (mm)	A
1,4	3,166833	****
2,1	3,235167	****
0,7	3,248667	****

Fonte: Elaborada pela autora.

4.4.1.4 Profundidade da raiz

De acordo com as médias exibidas na Tabela 17, há uma tendência de aumento da profundidade da raiz com o aumento da energia de soldagem. Já a velocidade de alimentação gerou uma tendência de aumento.

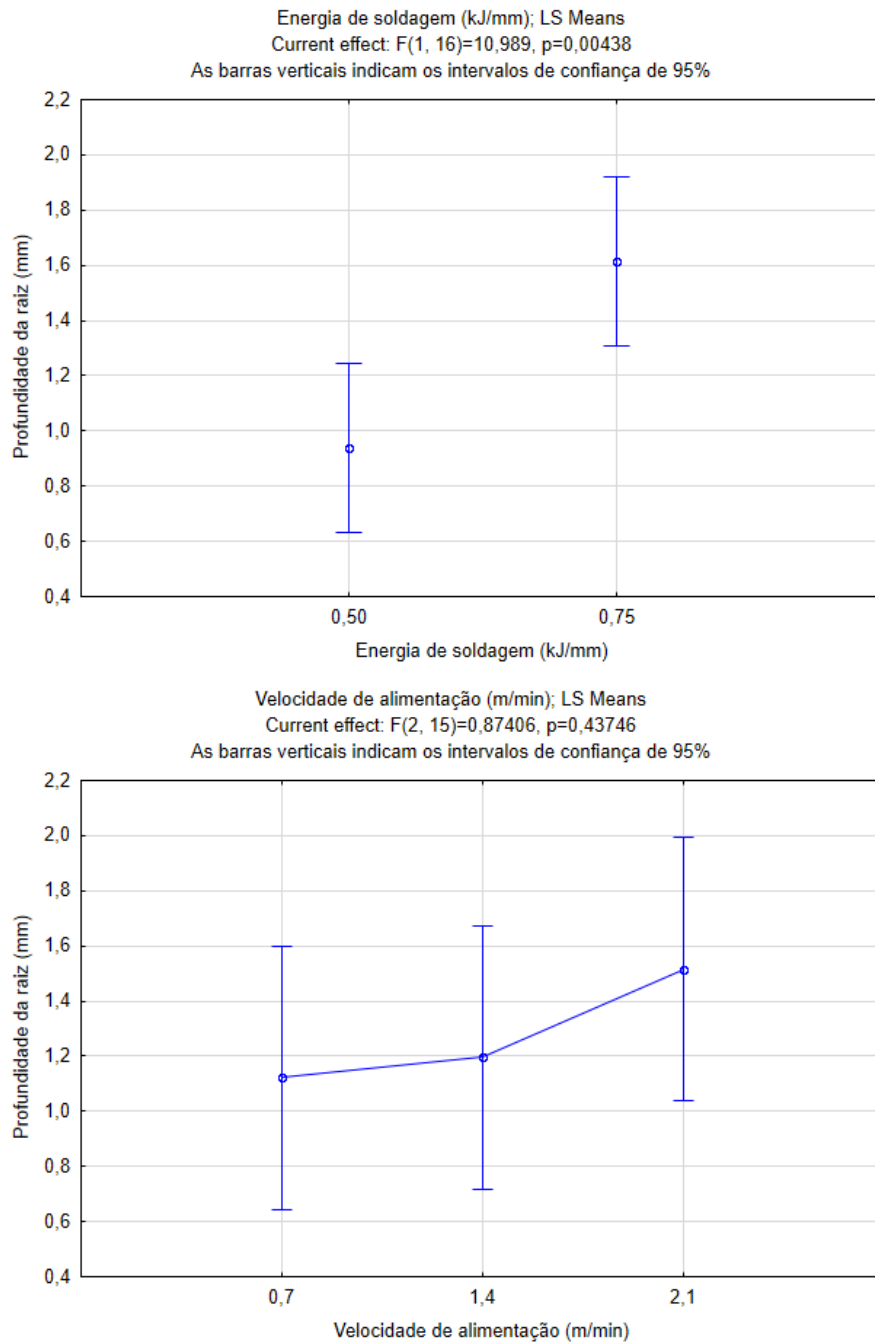
Tabela 17 – Profundidade da raiz dos cordões para análise variando energia de soldagem e velocidade de alimentação

Condição	Profundidade da raiz (mm)				
	Início	Meio	Fim	Média	Desvio padrão
E2-A1	1,201	0,956	0,864	1,007	0,174
E2-A2	1,205	0,999	0,819	1,008	0,193
E2-A3	0,827	0,799	0,781	0,802	0,023
E3-A1	1,323	1,194	1,188	1,235	0,076
E3-A2	1,390	1,480	1,276	1,382	0,102
E3-A3	2,103	1,586	2,996	2,228	0,713

Fonte: Elaborada pela autora.

Com a análise de variância presente nos gráficos da Figura 45, as tendências comentadas em relação à média ficam mais perceptíveis e são ratificadas pelos fatores $F > 1$ e $p < 0,5$, para energia de soldagem. Para a velocidade de alimentação, $F < 1$ e $p > 0,05$, não há diferenças estatisticamente significativas, embora haja uma tendência de aumento da profundidade da raiz com o aumento deste parâmetro.

Figura 45 – Gráfico com a influência da velocidade de alimentação e energia de soldagem na profundidade da raiz dos cordões



Fonte: Elaborado pela autora.

Observando o teste de Tukey, exibido na Tabela 18 e Tabela 19, mostra que apenas a energia provoca médias com diferença estatística relevante.

Tabela 18 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência energia de soldagem na profundidade da raiz

Energia de soldagem (kJ/mm)	Profundidade da raiz (mm)	A	B
0,50	0,939000	****	
0,75	1,615111		****

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 19 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da velocidade de alimentação na profundidade da raiz

Velocidade de alimentação (m/min)	Profundidade da raiz (mm)	A
0,7	1,121000	****
1,4	1,194833	****
2,1	1,515333	****

Fonte: Elaborada pela autora.

4.4.1.5 Área da zona fundida

Como observado nos valores de média da Tabela 20, o aumento da energia de soldagem provocou uma tendência de aumento na área da zona fundida, e a velocidade de alimentação também ocasionou o mesmo comportamento.

Tabela 20 – Área da zona fundida dos cordões para análise variando energia de soldagem e velocidade de alimentação

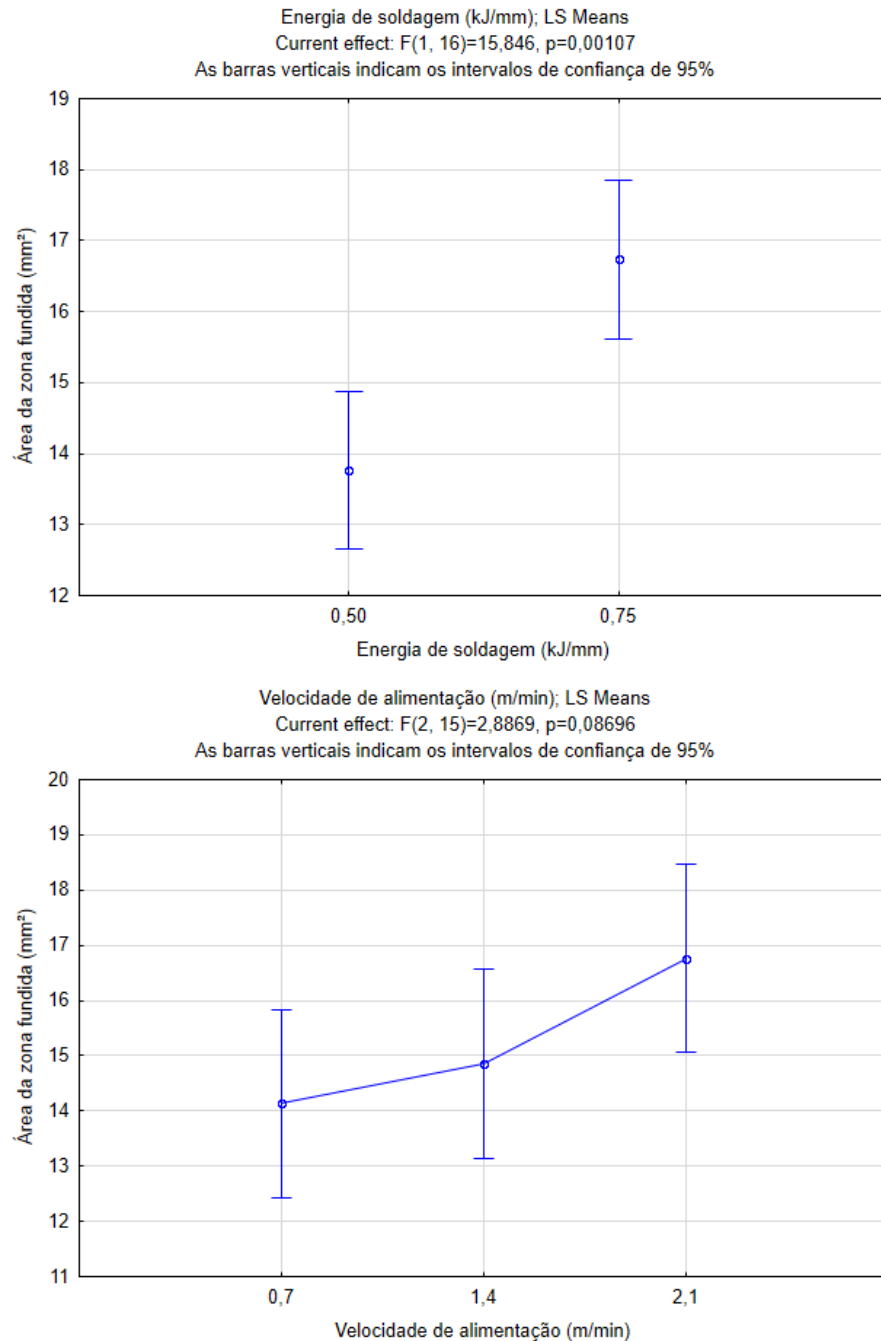
Condição	Área da zona fundida (mm ²)				
	Início	Meio	Fim	Média	Desvio padrão
E2-A1	12,987	13,142	12,721	12,950	0,213
E2-A2	14,543	14,145	13,404	14,031	0,578
E2-A3	13,885	14,941	14,128	14,318	0,553
E3-A1	15,549	15,250	15,154	15,318	0,206
E3-A2	15,098	16,413	15,525	15,679	0,671
E3-A3	19,010	17,467	21,149	19,209	1,849

Fonte: Elaborada pela autora.

Corroborando com análise feita dos valores brutos da média, a Figura 46 mostra que realmente há o aumento da área da zona fundida com o aumento da energia de soldagem.

Já os valores de média resultantes da variação da velocidade de alimentação não são estatisticamente diferentes, mas apresentam uma tendência de aumento da área da zona fundida ao crescer a taxa de adição de arame.

Figura 46 – Gráficos com a influência da velocidade de alimentação e energia de soldagem na área da zona fundida dos cordões



Fonte: Elaborado pela autora.

Com o teste de Tukey, Tabela 21 e Tabela 22, é possível confirmar os comentários anteriores, de que apenas energia de soldagem produz valores de média com diferenças

relevantes e que a área da zona fundida é proporcional à energia de soldagem. Também é notório que as médias de área não apresentam diferenças estatísticas com a mudança da velocidade de alimentação.

Tabela 21 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência energia de soldagem na área da zona fundida

Energia de soldagem (kJ/mm)	Área da zona fundida (mm²)	A	B
0,50	13,76622	****	
0,75	16,73500		****

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 22 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da velocidade de alimentação na área da zona fundida

Velocidade de alimentação (m/min)	Área da zona fundida (mm²)	A
0,7	14,13383	****
1,4	14,85467	****
2,1	16,76333	****

Fonte: Elaborada pela autora.

4.4.1.6 Diluição

Como observado nos valores de média, apresentados na Tabela 23, o aumento da velocidade de alimentação e da energia de soldagem apresentaram uma tendência de redução na diluição.

Tabela 23 – Diluição dos cordões para análise variando energia de soldagem e velocidade de alimentação

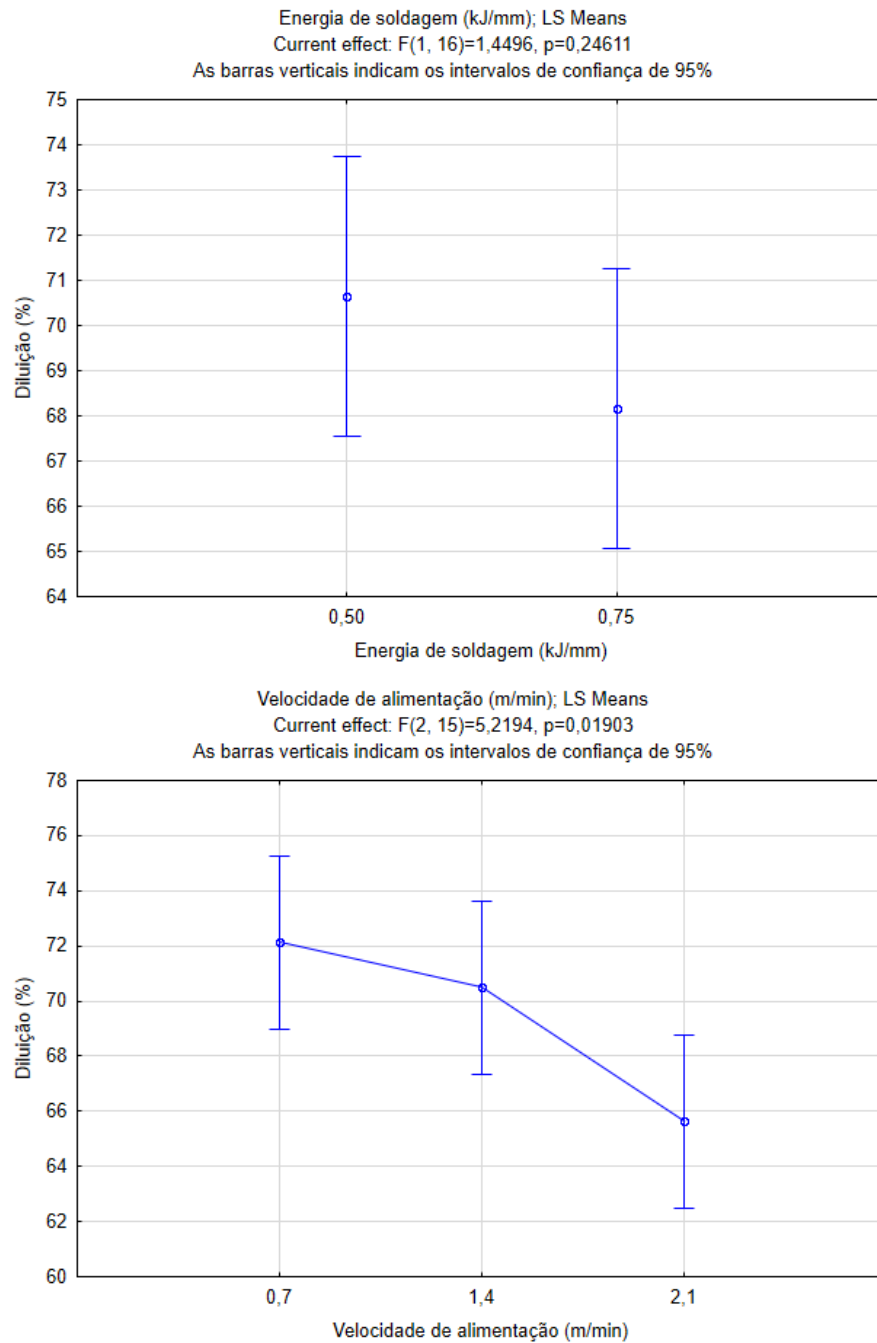
Condição	Diluição (%)				
	Início	Meio	Fim	Média	Desvio padrão
E2-A1	72,08	73,82	74,79	73,56	0,014
E2-A2	69,24	68,89	72,71	70,28	0,021
E2-A3	69,94	66,27	68,12	68,11	0,018
E3-A1	68,24	72,21	71,61	70,69	0,021
E3-A2	69,72	70,91	71,40	70,68	0,009
E3-A3	63,86	70,41	55,16	63,14	0,077

Fonte: Elaborada pela autora.

A mesma observação pode ser realizada ao analisar a Figura 47 e a análise de variância feita para gerá-lo, onde a única variável que apresenta pelo menos um resultado estatisticamente relevante é a velocidade de alimentação com $p < 0,05$ e $F > 1$. O aumento da energia, por sua vez, provocou uma tendência de redução na diluição, mas devido o valor de $p > 0,05$, a hipótese nula é aceita.

A tendência de aumento observada para a diluição com a redução da velocidade de alimentação é um resultado esperado, já que ao reduzir a quantidade de material adicionado o percentual de participação do metal de base na zona fundida deve ser maior.

Figura 47 – Gráfico com a influência da velocidade de alimentação e energia de soldagem na diluição



Fonte: Elaborado pela autora.

O teste de Tukey presente na Tabela 24 e Tabela 25, confirma que apenas a velocidade de alimentação tem efeito de médias estatisticamente diferentes.

Tabela 24 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência energia de soldagem na diluição

Energia de soldagem (kJ/mm)	Diluição	A
0,75	0,681683	****
0,50	0,706510	****

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 25 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da velocidade de alimentação na diluição

Velocidade de alimentação (m/min)	Diluição	A	B
2,1	0,656252	****	
1,4	0,704798	****	****
0,7	0,721239		****

Fonte: Elaborada pela autora.

4.4.2 Efeito da energia de soldagem e vazão do gás de plasma

4.4.2.1 Largura

Com as médias das juntas onde foram variadas a energia de soldagem e a vazão do gás de plasma, disponíveis na Tabela 26, é possível notar que a tendência de aumento da largura dos cordões com o aumento da energia de soldagem se mantém. Mas o aumento da vazão do gás de plasma não demonstra um comportamento padronizado.

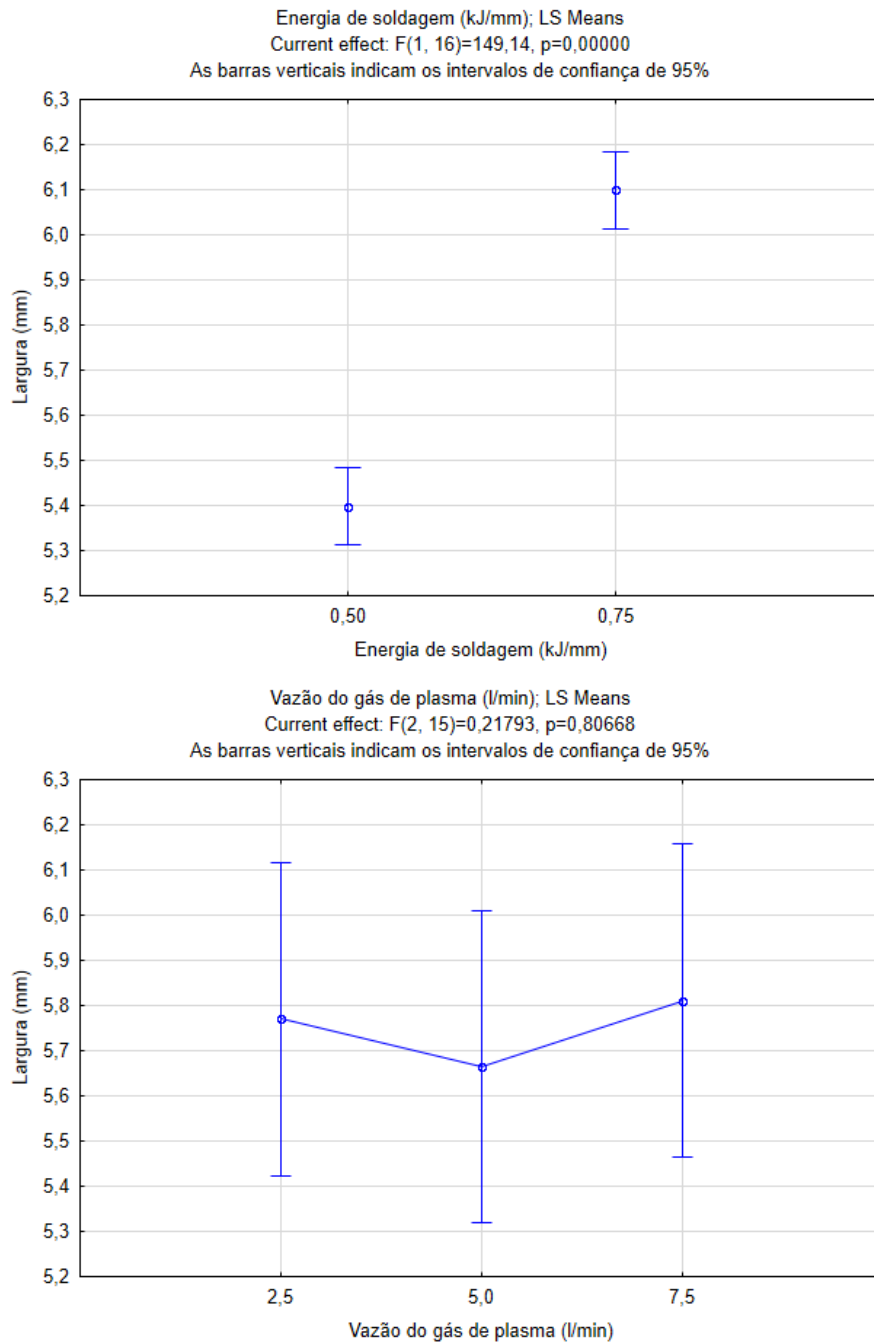
Tabela 26 – Largura dos cordões para análise variando energia de soldagem e vazão do gás de plasma

Condição	Largura (mm)				
	Início	Meio	Fim	Média	Desvio padrão
E2-A2-G1	5,506	5,534	5,368	5,469	0,089
E2-A2-G2	5,341	5,113	5,182	5,212	0,117
E2-A2-G3	5,612	5,497	5,433	5,514	0,091
E3-A2-G1	6,024	6,081	6,108	6,071	0,043
E3-A2-G2	6,172	6,109	6,069	6,117	0,052
E3-A2-G3	6,157	6,113	6,056	6,109	0,051

Fonte: Elaborada pela autora.

As observações acerca da média são confirmadas pelos gráficos da Figura 48. Com valor de $F > 1$ e $p < 0,05$, é possível observar que o aumento da energia de soldagem ocasionou médias de reforço estatisticamente diferentes. Já a vazão do gás de plasma, não produziu médias com diferença estatística em um intervalo de confiança de 95%.

Figura 48 – Gráficos com a influência da vazão do gás de plasma e energia de soldagem na largura dos cordões



Fonte: Elaborado pela autora.

O teste de Tukey, apresentado na Tabela 27 e Tabela 28, confirma que apenas com a variação da energia de soldagem foram obtidos valores de média com diferenças relevantes.

Tabela 27 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência energia de soldagem na largura

Energia de soldagem (kJ/mm)	Largura (mm)	A	B
0,50	5,398444	****	
0,75	6,098778		****

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 28 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da vazão do gás de plasma na largura

Vazão do gás de plasma (m/min)	Largura (mm)	A
5,0	5,664333	****
2,5	5,770167	****
7,5	5,811333	****

Fonte: Elaborada pela autora.

4.4.2.2 Reforço

Da mesma forma que as condições com variação de velocidade de alimentação e energia de soldagem, conforme observado nos valores de média da Tabela 29, o reforço apresentou uma tendência de redução com o aumento da energia. Já a variação da vazão do gás de plasma não apresentou uma tendência clara.

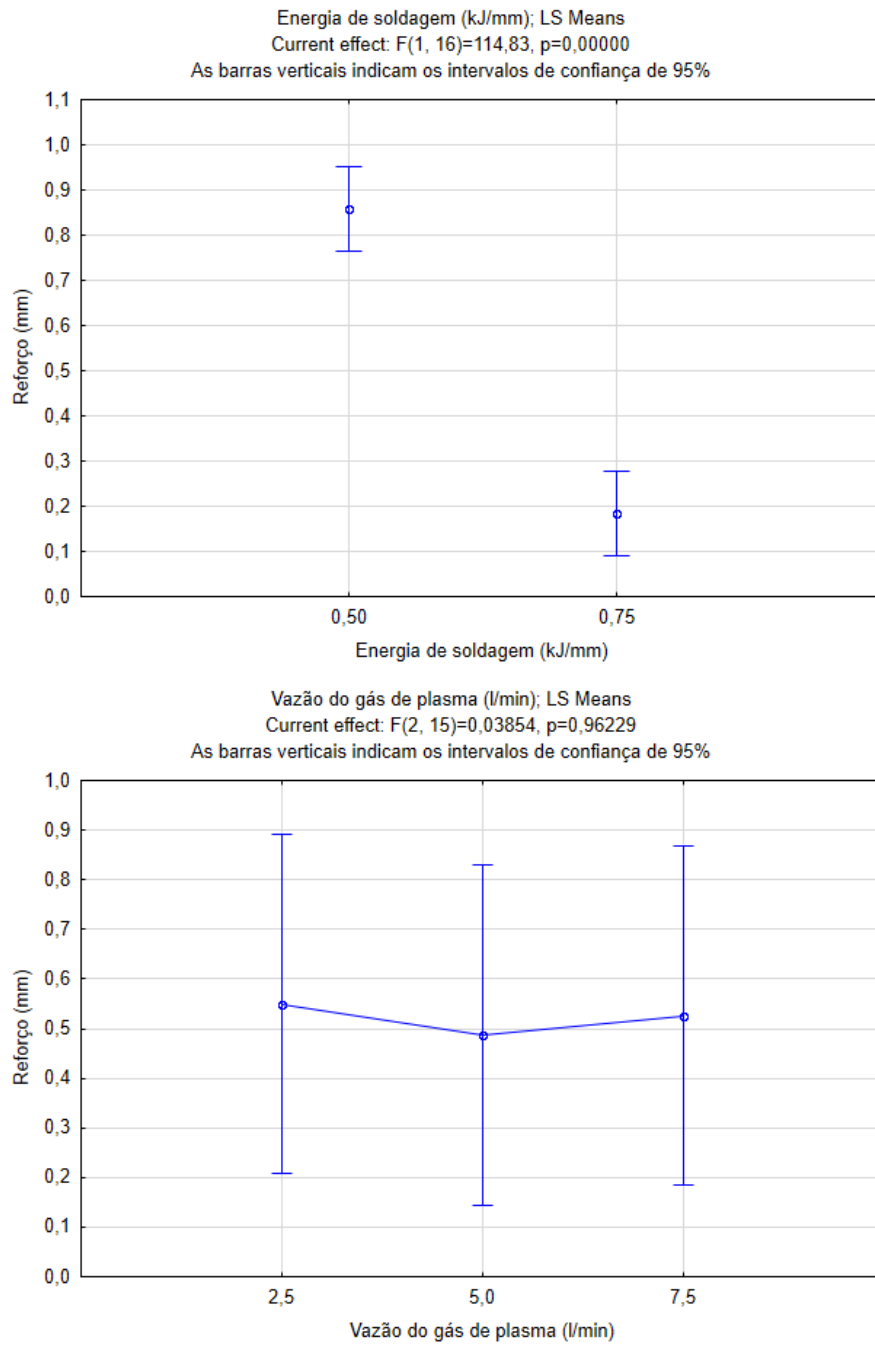
Tabela 29 – Reforço dos cordões para análise variando energia de soldagem e vazão do gás de plasma

Condição	Reforço (mm)				
	Início	Meio	Fim	Média	Desvio padrão
E2-A2-G1	0,925	1,084	0,651	0,887	0,219
E2-A2-G2	0,693	0,927	0,758	0,793	0,121
E2-A2-G3	0,903	0,910	0,872	0,895	0,020
E3-A2-G1	0,459	0,119	0,058	0,212	0,216
E3-A2-G2	0,034	0,287	0,223	0,181	0,132
E3-A2-G3	0,098	0,220	0,155	0,158	0,061

Fonte: Elaborada pela autora.

As análises de variância e de Tukey, Figura 49, Tabela 30 e Tabela 31, respectivamente, mostram que apenas a energia tem influência estatisticamente relevante no reforço, apresentando um valor de $p < 0,05$ e $F > 1$. No entanto, para o efeito da vazão do gás de plasma foram encontrados os valores de F menor que 1 e p maior que 0,05, fazendo com que a hipótese de as médias são estatisticamente iguais seja aceita.

Figura 49 – Gráfico com a influência da vazão do gás de plasma e energia de soldagem no reforço dos cordões



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 30 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência energia de soldagem no reforço

Energia de soldagem (kJ/mm)	Reforço (mm)	A	B
0,75	0,183667	****	
0,50	0,858111		****

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 31 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da vazão do gás de plasma no reforço

Vazão do gás de plasma (m/min)	Reforço (mm)	A
5,0	0,487000	****
7,5	0,526333	****
2,5	0,549333	****

Fonte: Elaborada pela autora.

4.4.2.3 Largura da raiz

Como é possível notar na Tabela 32, a tendência de aumento da largura da raiz com o aumento da energia se mantém, mas não há um comportamento claro quanto à variação da vazão do gás.

Tabela 32 – Largura da raiz dos cordões para análise variando energia de soldagem e vazão do gás de plasma

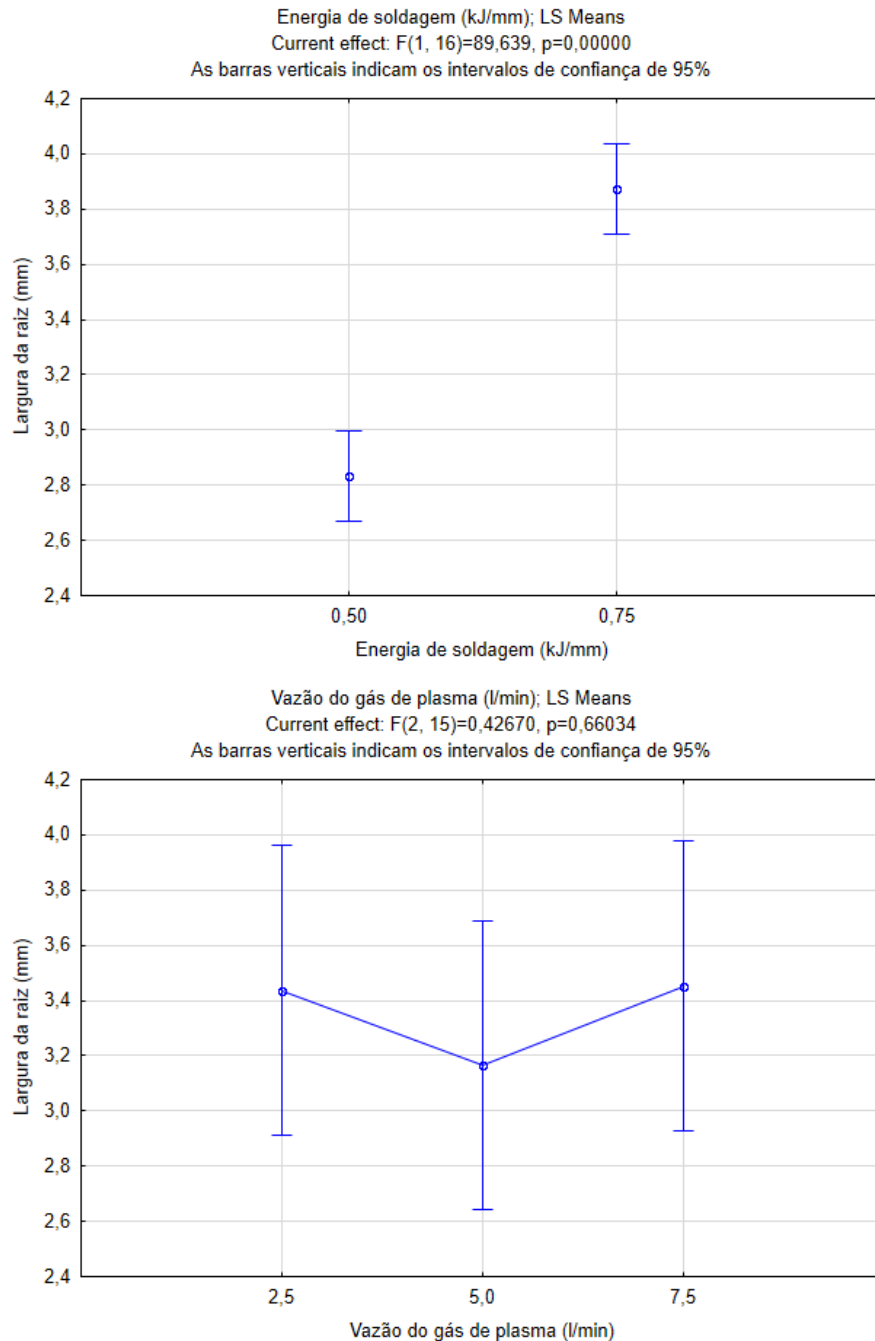
Condição	Largura da raiz (mm)				
	Início	Meio	Fim	Média	Desvio padrão
E2-A2-G1	2,794	3,092	3,084	2,990	0,170
E2-A2-G2	2,827	2,746	2,637	2,737	0,095
E2-A2-G3	2,777	2,934	2,594	2,768	0,170
E3-A2-G1	3,687	4,019	3,945	3,884	0,174
E3-A2-G2	3,668	3,477	3,646	3,597	0,105
E3-A2-G3	3,942	4,385	4,081	4,136	0,227

Fonte: Elaborada pela autora.

O efeito da energia de soldagem, ilustrado no gráfico da Figura 46, com valor de $F > 1$ e $p = 0,00$, mostra que as médias são estatisticamente diferentes e que a energia de

soldagem e a largura da raiz são diretamente proporcionais. Já para a vazão do gás de plasma, considera-se que o efeito do parâmetro não foi relevante nas médias, visto que os valores de F e p foram, respectivamente, 0,4267 e 0,66034.

Figura 50 – Gráfico com influência da vazão do gás de plasma e energia de soldagem na largura da raiz dos cordões



Fonte: Elaborado pela autora.

O teste de Tukey, Tabela 33 e Tabela 34, confirma que apenas a energia de soldagem gerou médias da largura de raiz distintas estatisticamente.

Tabela 33 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência energia de soldagem na largura da raiz

Energia de soldagem (kJ/mm)	Largura da raiz (mm)	A	B
0,50	2,831667	****	
0,75	3,872222		****

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 34 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da vazão do gás de plasma na largura da raiz

Vazão do gás de plasma (m/min)	Largura da raiz (mm)	A
5,0	3,166833	****
2,5	3,436833	****
7,5	3,452167	****

Fonte: Elaborada pela autora.

4.4.2.4 Profundidade da raiz

As medidas de profundidade da raiz das condições onde houve variação do gás de plasma, estão apresentadas na Tabela 35. Nos valores de média, nota-se a mesma tendência de aumento da penetração com o aumento da energia de soldagem.

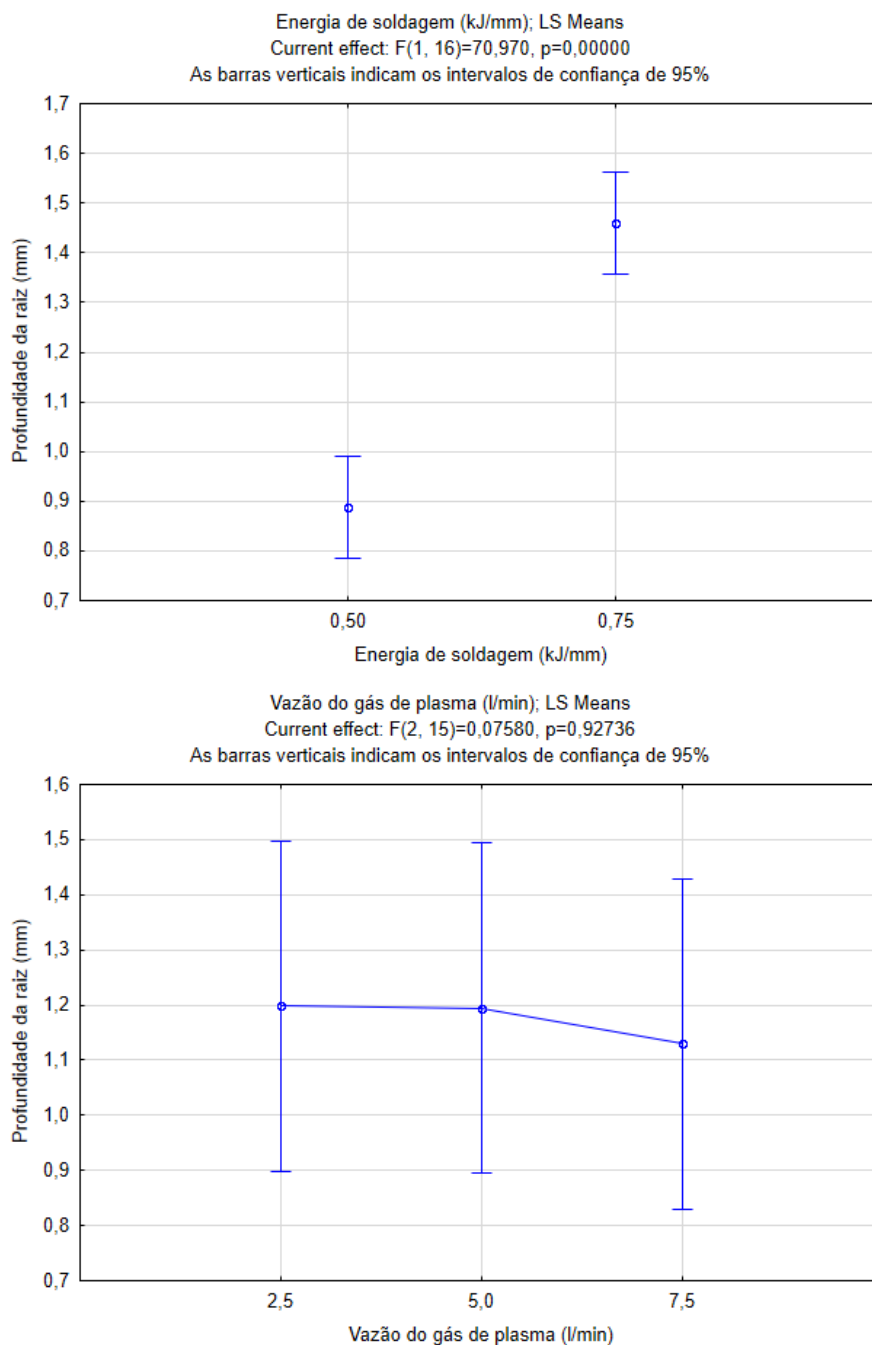
Tabela 35 – Profundidade da raiz dos cordões para análise variando energia de soldagem e vazão do gás de plasma

Condição	Profundidade da raiz (mm)				Desvio padrão
	Início	Meio	Fim	Média	
E2-A2-G1	0,833	0,750	1,085	0,889	0,174
E2-A2-G2	1,205	0,999	0,819	1,008	0,193
E2-A2-G3	0,737	0,812	0,754	0,768	0,039
E3-A2-G1	1,428	1,452	1,640	1,507	0,116
E3-A2-G2	1,390	1,480	1,276	1,382	0,102
E3-A2-G3	1,549	1,576	1,348	1,491	0,125

Fonte: Elaborada pela autora.

Com os gráficos da Figura 51, nota-se que, em um intervalo de confiança maior que 95% ($p << 0,05$), a energia de soldagem tem influência estatisticamente relevante. Todavia é perceptível tanto pelo gráfico, como pela Tabela 36 e Tabela 37 (teste de Tukey), que a vazão do gás de plasma não produz diferença significativa.

Figura 51 – Gráfico com a influência da energia de soldagem e vazão do gás de plasma na profundidade da raiz dos cordões



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 36 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência energia de soldagem na profundidade da raiz

Energia de soldagem (kJ/mm)	Profundidade da raiz (mm)	A	B
0,50	0,888222	****	
0,75	1,459889		****

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 37 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da vazão do gás de plasma na profundidade da raiz

Vazão do gás de plasma (m/min)	Profundidade da raiz (mm)	A
7,5	1,129333	****
5,0	1,194833	****
2,5	1,198000	****

Fonte: Elaborada pela autora.

Seria esperado, porém, que com o aumento da vazão do gás de plasma, para uma mesma velocidade de alimentação, a profundidade da raiz (penetração) fosse maior, já que há uma maior força exercida pelo arco e o fluxo mais forte sugere que a poça deveria ser “empurrada”. Isso pode sugerir que há o efeito de algum outro parâmetro, que possa atuar na energia de soldagem disponível para fusão do metal de base, por exemplo o ângulo que o metal de adição incide na peça, consumindo mais ou menos energia do arco.

4.4.2.5 Área da zona fundida

Como observa-se na Tabela 38, a energia de soldagem provocou a mesma tendência de aumento, mas a vazão do gás de plasma provocou um comportamento sem tendência clara.

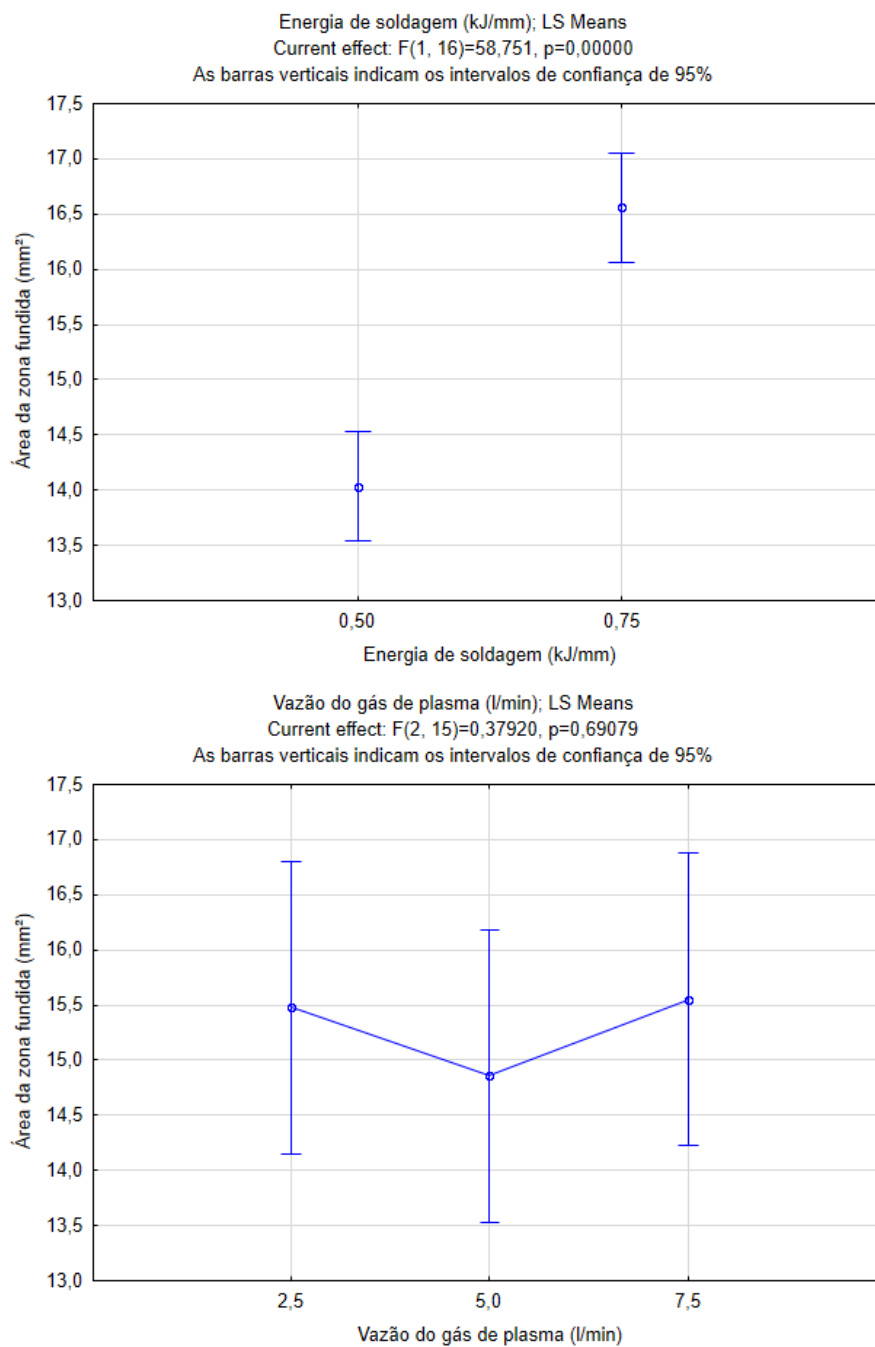
Tabela 38 – Área da zona fundida dos cordões para análise variando energia de soldagem e vazão do gás de plasma

Condição	Área da zona fundida (mm ²)				
	Início	Meio	Fim	Média	Desvio padrão
E2-A2-G1	14,195	14,698	14,006	14,300	0,358
E2-A2-G2	14,543	14,145	13,404	14,031	0,578
E2-A2-G3	13,838	14,161	13,296	13,765	0,437
E3-A2-G1	16,862	16,839	16,270	16,657	0,335
E3-A2-G2	15,098	16,413	15,525	15,679	0,671
E3-A2-G3	17,043	18,058	16,909	17,337	0,628

Fonte: Elaborada pela autora.

O comportamento citado acima também pode ser visto nos gráficos da Figura 52, o qual mostra que para um intervalo de confiança maior que 95% ($p = 0,00$), a energia de soldagem influencia de modo que há, pelo menos uma condição, em que a média é estatisticamente diferente. Já para a vazão do gás de plasma, a hipótese nula deve ser aceita.

Figura 52 – Gráfico com a influência da vazão do gás de plasma e energia de soldagem na área da zona fundida dos cordões



Fonte: Elaborado pela autora.

O teste de Tukey, Tabela 39 e Tabela 40, mostra que há diferença estatísticas entre as medias geradas pela variação da energia de soldagem, mas não há diferença entre as médias para o efeito da vazão de gás.

Tabela 39 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência energia de soldagem na área da zona fundida

Energia de soldagem (kJ/mm)	Área da zona fundida (mm²)	A	B
0,50	14,03178	****	
0,75	16,55744		****

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 40 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da vazão do gás de plasma na área da zona fundida

Vazão do gás de plasma (m/min)	Área da zona fundida (mm²)	A
5,0	14,85467	****
2,5	15,47833	****
7,5	15,55083	****

Fonte: Elaborada pela autora.

4.4.2.6 Diluição

Analisando as médias da Tabela 41, o aumento da vazão de gás também não produziu uma tendência clara nesse parâmetro.

Tabela 41 – Diluição dos cordões para análise variando energia de soldagem e vazão do gás de plasma

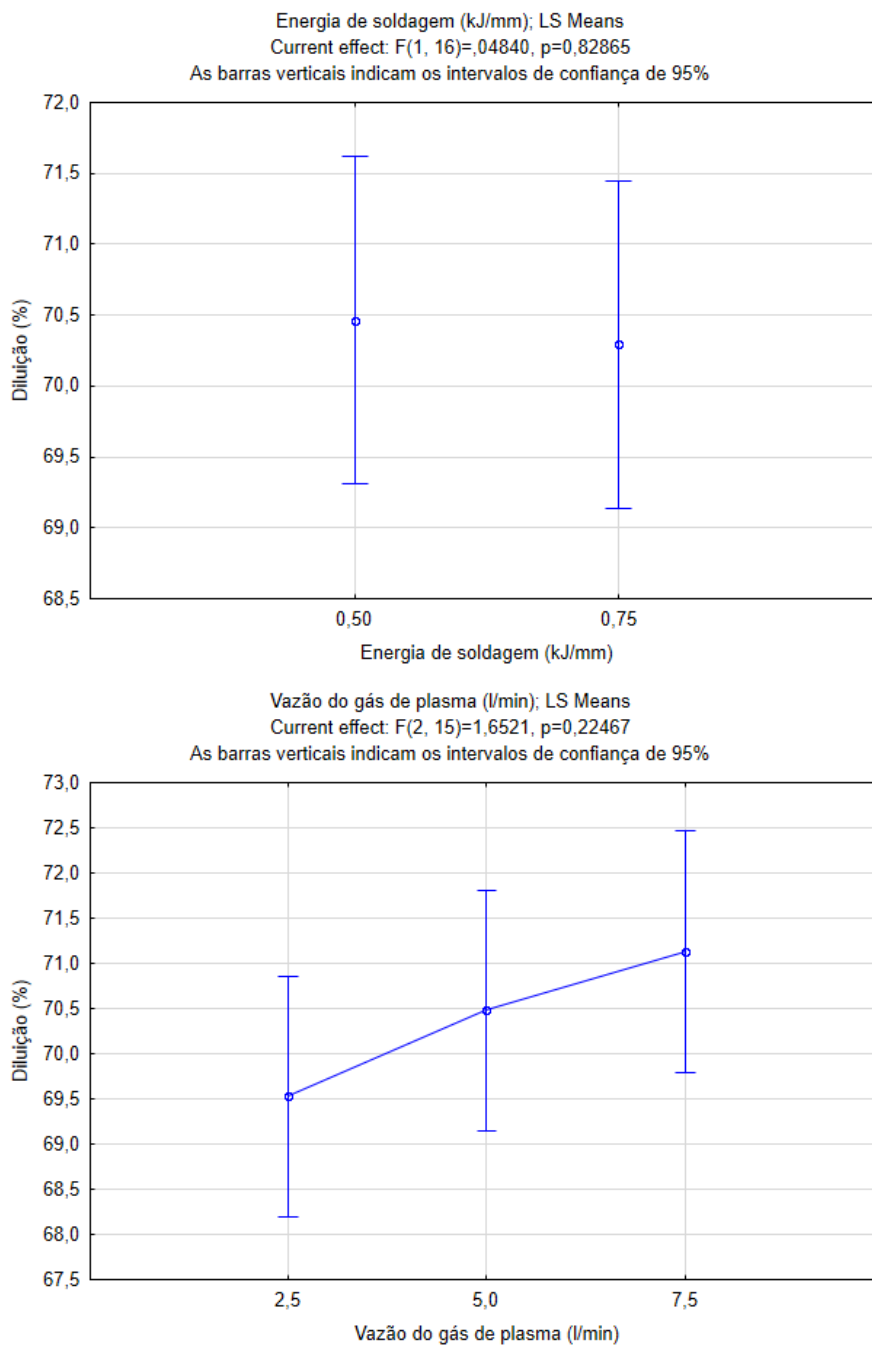
Condição	Diluição (%)				
	Início	Meio	Fim	Média	Desvio padrão
E2-A2-G1	69,93	68,61	69,36	69,30	0,007
E2-A2-G2	69,24	68,89	72,71	70,28	0,021
E2-A2-G3	71,95	71,32	72,16	71,81	0,004
E3-A2-G1	70,11	71,03	68,13	69,76	0,015
E3-A2-G2	69,72	70,91	71,40	70,68	0,009
E3-A2-G3	68,54	69,12	73,68	70,45	0,028

Fonte: Elaborada pela autora.

Ao observar a Figura 53, fica evidente que não há diferenças estatisticamente significantes entre as medidas realizadas e isto também se comprova pela Tabela 42 e Tabela 43. Embora seja notado que tenha havido uma tendência de aumento na diluição com o aumento

da vazão do gás de plasma e uma tendência de redução com o aumento da energia de soldagem. O primeiro comportamento é esperado, mas o segundo não.

Figura 53 – Gráfico com a influência da vazão do gás de plasma e energia de soldagem na diluição



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 42 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência energia de soldagem na diluição

Energia de soldagem (kJ/mm)	Diluição	A
0,75	0,702943	****
0,50	0,704641	****

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 43 – Teste de Tukey de grupos homogêneos para a influência da vazão do gás de plasma na diluição

Vazão do gás de plasma (m/min)	Diluição	A
2,5	0,695295	****
5,0	0,704798	****
2,1	0,711283	****

Fonte: Elaborada pela autora.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo analisar a influência da variação dos parâmetros da soldagem a plasma (energia de soldagem, velocidade de alimentação e vazão do gás de plasma), de modo mais específico a técnica *keyhole* com adição de arame frio, na presença de defeitos, internos e/ou externos, bem como na geometria dos cordões de solda produzidos. Após a realização do estudo, conclui-se que:

Em todas as condições de soldagem realizadas houve a presença de mordeduras, mudando apenas a profundidade das mesmas ou o/os lado/os que foram identificadas. É possível que o desnível das juntas possa ter influenciado na presença deste defeito, mas a ocorrência em juntas niveladas, leva a crer que há a interferência de outros fatores, por exemplo a velocidade de soldagem ou desalinhamento da tocha em relação à junta.

Ainda em relação às discontinuidades, não foram notadas a presença de defeitos internos ou externo das juntas, com exceção apenas das condições de menor energia (100 A e 0,27 kJ/mm) que não se mostraram boas condições para as velocidades de alimentação escolhidas para este estudo.

Em ambos os grupos, a energia de soldagem apresentou um valor de F maior que 1 e de p menor que 0,05 nas medidas de largura, reforço, largura da raiz, profundidade da raiz e área da zona fundida. Em todas, com exceção ao reforço, o aumento da energia de soldagem provocou um comportamento crescente, sendo diretamente proporcional. O comportamento de redução do reforço é inversamente proporcional e esperado.

A velocidade de alimentação implicou em valores estatisticamente distintos apenas nas medidas de diluição, apresentando um comportamento inversamente proporcional. No entanto foi possível notar que a velocidade de alimentação gera uma tendência de valores crescentes, com o acréscimo neste parâmetro, para as medidas de reforço, profundidade da raiz e área da zona fundida.

A vazão de gás de plasma, por sua vez, não gerou valores estatisticamente diferentes ($F < 1$ ou próximo a 1, e $p > 0,05$). Todavia, nota-se uma tendência de aumento da diluição com a incrementação deste parâmetro e de redução na profundidade da raiz.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 5601: 2011. **Aços inoxidáveis — Classificação por composição química**. , 2011.

AIR LIQUIDE. **Soldadura por arco de plasma**. Disponível em:
<<https://pt.airliquide.com/solucoes/soldadura-industrial/soldadura-por-arco-de-plasma>>.
Acesso em: 6 mar. 2025.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook - Welding Technology**. 8. ed.
Miami: [s.n.]. v. 1

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook**. Em: **Welding Handbook**. 8. ed.
[s.l: s.n.]. v. 2p. 330–350.

ASM INTERNATIONAL. **Welding**. Em: DAVIS, J. R. (Ed.). **Stainless Steels - ASM Specialty Handbook**. 2th. ed. [s.l.] ASM International, 1999. p. 340–401.

AUTOGEN-RITTER GMBH. **PHW 21- Plasma Welding Torch**. Disponível em:
<<https://www.autogenritter.com/en/products/plasma-cutting-torches/phw-21/>>. Acesso em: 10 fev. 2025.

DEMEC - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA. **Diagrama de Schaeffler**.
Universidade Federal do Paraná (UFPR), , abr. 2015. Disponível em:
<<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM315/Diagramas%20PDF/Diagrama%20de%20Schaeffler.pdf>>. Acesso em: 11 out. 2024

FAN, H. G.; KOVACEVIC, R. **Keyhole formation and collapse in plasma arc welding**.
Phys. D: Appl. Phys. [s.l: s.n.]. Disponível em:
<<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/32/22/312>>. Acesso em: 29 set. 2024.

FUERSCHBACH, P. W.; KNOROVSKY, G. A. A Study of Melting Efficiency in Plasma Arc and Gas Tungsten Arc Welding A method for selecting optimal weld schedules to minimize net heat input is derived from calorimetric measurements. **Welding Journal Supplement**, p. 287s–298s, out. 1991.

GF MACHINING SOLUTIONS. **AgieCharmilles CUT E Series**. Disponível em:
<<https://www.gfms.com/pt-br/machines/edm/wire-cutting/agiecharmilles-cut-e-series.html>>.
Acesso em: 12 fev. 2025.

GOLAŃSKI, D. et al. Advanced Applications of Microplasma Welding. **Biuletyn Instytutu Spawalnictwa**, v. 2018, n. 5, p. 53–63, 2018.

HARRIS, I. D. PLASMA ARC WELDING. Em: OLSON, D. L. et al. (Eds.). **ASM Handbook, Welding, Brazing, and Soldering**. [s.l.] ASM International, 1993. v. 6p. 195–199.

KOU, S. Plasma Arc Welding. Em: **Welding Metallurgy**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003. p. 16–19.

LIU, Z. M. et al. **Plasma arc welding: Process variants and its recent developments of sensing, controlling and modeling**. **Journal of Manufacturing Processes** Elsevier Ltd, , 1

ago. 2016.

LUCAS, W. Plasma Welding. Em: **TIG and PLASMA Welding: process techniques, recommended practices and applications**. Cambridge: Abington Publishing Woodhead Publishing Limited, 1990. p. 80–89.

MARTIKAINEN, J. K.; MOISIO, T. J. I. Investigation of the Effect of Welding Parameters on Weld Quality of Plasma Arc Keyhole Welding of Structural Steels. **Welding Journal - Welding Research Supplement**, n. 7, p. 329s–340s, jul. 1993.

METCALFE, J. C.; QUIGLEY, M. B. C. Keyhole Stability in Plasma Arc Welding. **Welding Journal**, v. 54, n. Research Supplement, p. 401.s-404.s, nov. 1975.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. Fissuração em juntas soldadas. Em: **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: [s.n.].

MOURA FILHO, A. J. S. DE. **Avaliação de juntas soldadas dos aços AISI 8630M e ASTM A182 F22 amanteadas pelo processo PTA com a liga de níquel UNS N06625**. Dissertação—Fortaleza: UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ, 2014.

NÚCLEO TECNOLÓGICO DE SOLDAGEM & QUALIDADE. Processo de soldagem plasma. Em: **Manual de Tecnologia de Fabricação e Soldagem**. São Paulo: [s.n.]. p. 1–13.

OLIVEIRA, M. A. DE. **Estudo do Processo Plasma com Alimentação Automática de Arame**. Florianópolis: UFSC, 2001.

REIS, R. P. **Soldagem plasma “Melt-in” de aço comum ao carbono**. Dissertação (Mestrado)—Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2005.

REIS, R. P.; SCOTTI, A. **Fundamentos e prática da soldagem a plasma**. São Paulo: Artliber Editora, 2007.

RICHETTI, A. **Aplicação do processo de soldagem por plasma pela técnica “keyhole” no passe de raiz de uma junta chanfrada**. Dissertação—Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, jul. 1998.

RICHETTI, A. **Análise e modelagem empírica do processo de soldagem a plasma com keyhole em aço inoxidável**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia (UFU), 2003.

RICHETTI, A.; FERRARESI, V. A. **Influência do Gás de Proteção na Soldagem a Plasma com Keyhole**. [s.l: s.n.]. Disponível em:
<<https://www.researchgate.net/publication/228460116>>. Acesso em: 3 set. 2024.

ROSA, A. F. DA et al. **Caracterização e análise da soldagem plasma com alimentação dinâmica de arame**. Curitiba11º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, , 24 maio 2021. Disponível em:
<https://labsolda.ufsc.br/publicacoes/artigos/2021_cobef_alisson.pdf>. Acesso em: 5 jan. 2025

SAM INFANT JONES, P. G. et al. Experimental studies on key-hole plasma arc welding

process parameters of AISI 304 HCu stainless steel tube joints. **Welding International**, v. 36, n. 11, p. 655–667, 2022.

SAM INFANT JONES, P. G. et al. Multicriteria optimization of the weld characteristics of keyhole plasma arc welding on super austenitic stainless steel: a mathematical approach. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing**, v. 17, n. 4, p. 1497–1513, 1 ago. 2023.

SATHISHKUMAR, M. et al. **Effect of Welding Speed on Aspect Ratio of Hastelloy X Weldment by Keyhole Plasma Arc Welding (K-PAW)** *Materials Today: Proceedings*. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 13 out. 2024.

VOESTALPINE BY BÖHLER WELDING. **Catálogo de Consumíveis para Soldas de União**. , [s.d.]. Disponível em: <<https://www.kezverchile.cl/wp-content/uploads/2018/09/Cat%C3%A1logo-de-soldaduras-B%C3%B6hler-Kezver-Chile.pdf>>. Acesso em: 11 fev. 2025

WIGGERS, J. F. et al. **SOLDAGEM TIG DE ALTA PERFORMANCE EM CHAPAS FINAS APLICADAS NA CONSTRUÇÃO DE COMPRESSORES**. XI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. **Anais...** Teresina: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas - ABCM, 23 ago. 2022. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/362851185_SOLDAGEM_TIG_DE_ALTA_PERFORMANCE_EM_CHAPAS_FINAS_APLICADAS_NA_CONSTRUCAO_DE_COMPRESSORES?enrichId=rgreq-b832e2619f6f284c9c16c15190fb75b6-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzM2Mjg1MTE4NTtBUzoxMTQzMTI4MTA4MDI0ODI1MkAxNjYxMjExNzU0NzIy&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf>. Acesso em: 22 dez. 2024

ZHAO, H.; YANG, C.; FAN, C. Research of a Novel Non-Axisymmetric Side-Compressed Variable Polarity Plasma Arc and Its Pressure Distribution Characteristics. **Metals**, v. 14, n. 2, p. 1–15, 1 fev. 2024.