

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA VARIAÇÃO DE GASES DE PROTEÇÃO NA SOLDAGEM
GMAW-STT® DO AÇO ASTM A-36

Allan Barbosa da Silva

Itajubá, Agosto de 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Allan Barbosa da Silva

ESTUDO DA VARIAÇÃO DE GASES DE PROTEÇÃO NA SOLDAGEM
GMAW-STT® DO AÇO ASTM A-36

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos
para obtenção do Título de Mestre em Ciências em
Engenharia Mecânica.**

Área de Concentração: Projeto, Materiais e Processos

Orientador: Dr. Edmilson Otoni Corrêa
Co-Orientador: Dr. Carlos Alberto Carvalho Castro

Agosto de 2021
Itajubá

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Allan Barbosa da Silva

**ESTUDO DA VARIAÇÃO DE GASES DE PROTEÇÃO NA SOLDAGEM GMAW-
STT® DO AÇO ASTM A-36**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 29 de setembro de 2021, conferindo ao autor o título de **Mestre em Ciência em Engenharia Mecânica**.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Edmilson Otoni Corrêa (Orientador)

Prof. Dr. Carlos Alberto Carvalho Castro (Co-Orientador)

Prof. Dr. Guilherme Ferreira Gomes

Profa. Dra. Renata Neves Penha

Prof. Dr. Sergio Souto Maior Tavares

"Dedico este trabalho à minha família, por todo o suporte fornecido ao longo dessa jornada."

Allan Barbosa da Silva

Agradecimentos

Agradeço primeiro à Deus, Ele que é o meu sustento e minha força.

Aos meus pais, Antônio Ideon da Silva e Rita Lucia Barbosa Silva, por todo carinho, amor, proteção e ensinamentos transmitidos ao longo de minha vida.

À minha família, em especial meu irmão Alexandre e minhas irmãs Amanda e Alice, por oferecerem apoio e desde sempre terem sido suportes indispensáveis.

Ao meu orientador, professor Dr Edmilson Otoni Correa, e meu coorientador, professor Dr Carlos Alberto Carvalho Castro, por todo tempo e apoio investidos, essenciais para meu crescimento profissional e pessoal.

Aos amigos que fiz durante o tempo do mestrado, e que dividiram diversos momentos comigo nessa jornada.

Ao meu amigo e mestre Eduardo Pereira da Silva, por todo o apoio e auxílio, desde o início da graduação, dividindo experiências e transmitindo sabedoria em diversos momentos, e que durante a realização desta pesquisa ofertou fundamental suporte na preparação dos ensaios.

À UNIFEI e ao CEFET-MG Campus Varginha, por todo apoio em termos de conhecimento e estrutura de laboratórios oferecidos para a realização deste trabalho.

E a todos que de forma direta ou indireta estiveram comigo nessa jornada.

“Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina.”

(Cora Coralina)

Resumo

Devido ao avanço de pesquisas e desenvolvimento de novos processos de soldagem é de suma importância a investigação dos efeitos que as variáveis de entrada exercem nas variáveis de saída. Portanto, é objetivo do presente trabalho investigar a influência do gás de proteção na soldagem GMAW com transferência por curto-circuito controlado, utilizando a tecnologia STT[®] aplicada ao aço estrutural ASTM A-36. O desenvolvimento do trabalho foi estruturado por meio de um planejamento experimental que permitisse avaliar a interação das variáveis estudadas - corrente de pico, corrente de base, velocidade de alimentação, velocidade de soldagem e gás de proteção. A primeira etapa consiste em uma análise exploratória, em que foi utilizado um planejamento fatorial fracionário, de forma que os efeitos principais das variáveis de entrada pudessem ser identificados com uma menor quantidade de ensaios. Após essa análise, foi utilizado fatorial completo para modelagem das saídas, já que não foi observada curvaturas nas respostas. As soldas foram realizadas sobre chapa (*bead on plate* – BOP), utilizando o processo GMAW-STT[®]. Para a análise das características geométricas do cordão as amostras foram preparadas valendo-se de técnicas metalográficas e, então, submetidas à microscopia ótica. A melhor condição foi repetida em juntas de topo utilizando tanto o processo STT[®] como o GMAW convencional, para efeito de comparação. Assim, os corpos de provas soldados foram preparados para os ensaios mecânicos de tração, microdureza e medição de Largura da ZTA e Penetração em Face. A variação do gás de proteção se mostrou determinante nas propriedades geométricas da junta soldada, e o processo STT[®] apresentou resultados de tamanho de ZTA menores que o GMAW Convencional. Para a Penetração em face os dois processos apresentaram respostas muito similares.

Palavras-chaves: Soldagem, GMAW, STT[®], Gás de Proteção, ASTM A-36

Abstract

Due to the advance of research and development of new welding processes, it is important to investigate the effects that the variables of entry perform on the variables of output. Therefore, the aim of this work is to investigate the influence of the welding parameters, mainly the shielding gas, on the GMAW STT[®] (Surface Tension TransferTM) derivative process applied in the welding of the ASTM A-36 structural steel, and compare its results with the GMAW process. For this purpose, a design of experiments was carried out, in form to evaluate the interaction of the variables studied at all levels. In the first phase of the research, screening experiments were conducted, using fractional factorial design, to explore the main effects of the input variables with less quantity of runs. After, in the next phase of the project, a full factorial design was used to responses modeling, once it did not present curvature. The welds were made in BOP (bead on plate) using GMAW STT[®] welding. For the analysis of the bead geometry the test specimens were prepared by mettalography and later submitted to optical macroscopy. The optimal condition will be repeated in top joints and welded by GMAW and STT[®] process welding, and the welded specimens prepared for the mechanical tests of traction, microhardness, Heat Afected Zone and Penetration measurement. The variation of the protection gas was determinant at the geometrical proprieties of the welded joint, and the STT process shower smaller results of ZTA size than the conventional GMAW. As of Penetration, both processes had similar response.

Key-words: *Welding, GMAW, STT[®], Shielding Gas, ASTM A-36*

Lista de Ilustrações

Figura 1- Processo de Soldagem GMAW (FORTES; VAZ, 2005)	23
Figura 2- Processo Curto-circuito convencional (Adaptado de DERUNTZ, 2003).....	24
Figura 3- Mapa de Transferência Metálica – Adaptado de Vilarinho 2007 (Nascimento 2015)	29
Figura 4- Sinais de corrente e tensão no tempo para a transferência por curto-circuito (Adaptado de WILHELM et al., 2010)	31
Figura 5- Geração de respingos em Transferência por curto-circuito convencional (WILHELM et al., 2010)	32
Figura 6- Forças que atuam na gota em transferência (OLIVEIRA; SANTOS; MIRANDA, 2020).....	35
Figura 7- Efeito Pinch (Adaptado de ARMAO et al., 2014).....	36
Figura 8- Forma de onda da corrente e sequência de transferência para o processo Lincoln STT® (Adaptado de NORRISH; CUIURI, 2014).....	40
Figura 9- Ciclo da Corrente no Processo de Soldagem por Transferência de tensão superficial (Adaptado DeRuntz2003).....	41
Figura 10- Efeito da condutividade térmica do gás na coluna de plasma	50
Figura 11- Comportamento do arco para diferentes teores de CO ₂ no gás de proteção (CAI et al 2017a)	53
Figura 12- Modelo geral de um processo ou sistema – Adaptado de Montgomery 2005 (Penteado, 2011).....	61
Figura 13- Ilustração do CP e sua montagem na junta a ser soldada	62
Figura 14- Bancada Experimental	64
Figura 15- Fonte de Soldagem Power Wave 350	64
Figura 16- Etapas da Pesquisa	65
Figura 17- Escopo do Projeto	67
Figura 18- Desenho da junta e indicação de suas respectivas dimensões	68
Figura 19- Estereoscópio utilizado na pesquisa	69
Figura 20- Medidas geométricas feitas nos corpos de prova.....	69
Figura 21- Medição de Largura da ZTA	70
Figura 22- Equipamento de Ensaio de Tração	71
Figura 23- CP usinado para o ensaio de tração	72
Figura 24- Microdurômetro modelo TH712.....	72

Figura 25- Medições de Microdureza.....	73
Figura 26- Corpo de prova nº31 e réplica.....	77
Figura 27- Gráfico de Pareto para o Reforço	79
Figura 28- Gráfico de Efeitos Principais para o Reforço	80
Figura 29- Gráfico de Efeitos Principais na Tensão Média.....	81
Figura 30- Gráfico de Efeitos Principais para Corrente Média.....	81
Figura 31- Gráfico de Interação para o Reforço.....	82
Figura 32- Gráfico de Resíduos para o Reforço	83
Figura 33- Gráfico de Pareto para a Largura.....	85
Figura 34- Gráfico de Efeitos Principais para a Largura.....	86
Figura 35- Gráfico de Interação para a Largura	87
Figura 36- Gráfico de Resíduos para a Largura	88
Figura 37- Gráfico de Pareto para a Penetração	90
Figura 38- Gráfico de Efeitos Principais na Penetração.....	90
Figura 39- Gráfico de Resíduos para a Penetração.....	92
Figura 40- Gráfico de Pareto para a Convexidade	94
Figura 41- Gráfico de Efeitos Principais para a Convexidade	94
Figura 42- Gráfico de Interação para Convexidade.....	95
Figura 43- Gráfico de Resíduos para a Convexidade	96
Figura 44- Gráfico de Pareto para a Diluição.....	98
Figura 45- Gráfico de Efeitos Principais para a resposta de Diluição.....	98
Figura 46- Gráfico para Resíduos de Diluição	99
Figura 47- Gráfico de Intervalos do Teste ANOVA para Penetração em face utilizando gás C8	101
Figura 48- Gráfico de Intervalos do Teste ANOVA para Penetração em face utilizando gás C25	102
Figura 49- Gráfico de Intervalos do Teste ANOVA para Penetração em face utilizando Processo STT	103
Figura 50- Gráfico de Intervalos do Teste ANOVA para Penetração em face utilizando Processo GMAW	103
Figura 51- Gráfico de Intervalos do Teste ANOVA para Largura da ZTA utilizando gás C8	105
Figura 52- Gráfico de Intervalos do Teste ANOVA para Largura da ZTA utilizando gás C25	105

Figura 53- Gráfico de Intervalos do Teste ANOVA para Largura da ZTA utilizando processo STT	107
Figura 54- Gráfico de Intervalos do Teste ANOVA para Largura da ZTA utilizando processo GMAW	107
Figura 55 - Gráfico de Intervalos do Teste ANOVA para Microdureza da ZTA	110
Figura 56- Gráfico de Interação para a Microdureza da ZTA.....	111
Figura 57- Perfil de Dureza nos Processos Estudados	112

Lista de Tabelas

Tabela 1: Quadro comparativo entre as características fundamentais do processo GMAW convencional e STT®	43
Tabela 2: Propriedades Físicas e Químicas dos gases Ar e CO ₂	49
Tabela 3: Potencial de Oxigênio (O _p) para diversas misturas Ar+CO ₂	50
Tabela 4: Composição química do aço ASTM A-36	63
Tabela 5: Composição química do eletrodo ER70S-6 ESAB	63
Tabela 6: Fatores de entrada e seus respectivos níveis de variação	66
Tabela 7: Dados Coletados nos Experimentos de Soldagem STT sobre chapa	74
Tabela 8: Análise de Variância para Altura do Reforço.....	78
Tabela 9: Ajustes para resposta do Reforço	78
Tabela 10: Análise de Variância para Largura do Cordão	83
Tabela 11: Ajustes para resposta da Largura.....	84
Tabela 12: Análise de Variância para Penetração	88
Tabela 13: Ajustes para resposta da Penetração.....	89
Tabela 14: Análise de Variância para Convexidade.....	93
Tabela 15: Ajustes da resposta de Convexidade	93
Tabela 16: Análise de Variância para Diluição	96
Tabela 17: Ajustes da resposta de Diluição.....	97
Tabela 18- Teste ANOVA para Penetração em face utilizando gás C8.....	101
Tabela 19- Teste ANOVA para Penetração em face utilizando gás C25.....	102
Tabela 20- Teste ANOVA para Penetração em face utilizando Processo STT.....	104
Tabela 21- Teste ANOVA para Penetração em face utilizando Processo GMAW Convencional	104
Tabela 22- Teste ANOVA para Largura da ZTA utilizando gás C8.....	105
Tabela 23- Teste ANOVA para Largura da ZTA utilizando gás C25.....	106
Tabela 24- Teste T para duas Amostras – Largura ZTA utilizando C8	106
Tabela 25- Teste T para duas Amostras – Largura ZTA utilizando C25	106
Tabela 26- Teste de Welch para Largura da ZTA utilizando processo STT.....	108
Tabela 27- Teste ANOVA para Largura da ZTA utilizando processo GMAW.....	108
Tabela 28- Teste T para duas Amostras – Largura ZTA utilizando processo STT.....	108
Tabela 29 - Resistência Média a Tração dos Corpos de Prova Soldados.....	109
Tabela 30- Análise de Variância para Microdureza da ZTA.....	110

Lista de Abreviaturas e Siglas

GMAW – Gas Metal Arc Welding

STT[®] – *Surface Tension Transfer*

GTAW – Gas Tungsten Arc Welding

SMAW – Shielding Metal Arc Welding

ZTA – Zona Termicamente Afetada

ASTM – American Society for Testing and Materials

C8 – Gás de proteção composto por 8% de CO₂ e 92% de Argônio

C25 – Gás de proteção composto por 25% de CO₂ e 75% de Argônio

DOE – *Design of Experiments*

MB – Metal de Base

MA – Metal de Adição

HSLA – *High Strength Low Alloy steel* (Aço de alta resistência e baixa liga)

CC – Corrente Contínua

GMAW-S – GMAW Shorting Process

DBCP – Distância Bico de contato peça

CS-GMAW – Controlled Short Circuit Gas Metal Arc Welding

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AF – *Acicular Ferrite* (Ferrita Acicular)

MSR – *Response Surface Methodology* (Metodologia de Superfície de Resposta)

ANOVA – Análise de Variância

LOF – Lack of fit

BOP – *Bead on plate* (Cordão sobre chapa)

CP – Corpo de Prova

LABSit – Laboratório de Soldagem e Inovação Tecnológica

CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

LEN – Laboratório de Ensaios Destrutivos e Não Destrutivos

IEM – Instituto de Engenharia Mecânica

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

LMM – Laboratório de Metalurgia e Materiais

AWS – American Welding Society

WFS – *Wire Feed Speed* (Velocidade de alimentação do arame)

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Objetivos	17
1.1.1 Objetivo Geral.....	17
1.1.2 Objetivos Específicos.....	17
1.2 Justificativa.....	18
1.3 Delineamento do trabalho	19
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 Soldabilidade dos aços ao carbono.....	21
2.2 Processo GMAW.....	22
2.2.1 Variáveis do processo	25
2.2.2 Transferência Metálica.....	28
2.2.2.1 Transferência por curto-circuito.....	29
2.2.2.2 Transferência controlada.....	32
2.2.2.3 Forças que atuam na transferência	34
2.2.3 Vantagens e Desvantagens.....	37
2.3 Processo GMAW STT®.....	38
2.3.1 Comparação do Processo GMAW Tradicional com o Processo STT®	42
2.3.2 Vantagens, Benefícios e Limitações.....	44
2.3.2.1 Vantagens.....	44
2.3.2.2 Limitações.....	46
2.4 Gás de proteção	46
2.4.1 Propriedades dos gases.....	48
2.4.2 Gases utilizados na soldagem GMAW	51
2.4.3 Efeitos do CO ₂ no gás de proteção	52
2.4.3.1 Efeito no arco elétrico e estabilidade	52
2.4.3.2 Efeito nas características geométricas e formato do cordão	54
2.4.3.3 Efeito nas propriedades mecânicas e microestrutura	56

2.4.4 Porosidade e inclusão	57
2.5 Planejamento de Experimentos	58
3 MATERIAIS E MÉTODOS	62
3.1 Materiais	62
3.1.1 Metal Base.....	62
3.1.2 Metal de Adição	63
3.1.3 Gás de Proteção.....	63
3.1.4 Equipamentos.....	63
3.2 Métodos	65
3.2.1 Método Experimental.....	65
3.2.2 Preparação das amostras para Soldagem.....	67
3.2.3 Preparação das amostras para Caracterização Geométrica	68
3.2.4 Ensaio Mecânicos	71
3.2.4.1 Ensaio de Tração	71
3.2.4.2 Ensaio de Microdureza.....	72
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
4.1 Matriz de Experimentos das soldas em STT®	74
4.2 Análise Qualitativa das Soldas em STT®	76
4.3 Características Geométricas das Soldas no Processo STT®	77
4.3.1 Altura do reforço	78
4.3.2 Largura do cordão	83
4.3.3 Penetração	88
4.3.4 Convexidade.....	92
4.3.5 Diluição.....	96
4.4 Juntas Soldadas em Chanfro – STT® x GMAW	100
4.4.1 Penetração em face.....	100
4.4.2 Largura da ZTA.....	104
4.4.3 Propriedades Mecânicas.....	108

5 CONCLUSÃO.....	113
6 REFERÊNCIAS.....	115

1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem por arco elétrico com gás de proteção (do inglês *Gas Metal Arc Welding – GMAW*) destaca-se pelo seu amplo uso industrial. É um processo de união muito utilizado na construção naval, automobilística, em estruturas e fabricação de vasos de pressão e oleodutos, devido à sua boa eficiência e qualidade, aliado à metodologia simples, facilidade de automação e aplicação em diversas posições de soldagem (YANG *et al.*, 2018, COSTA, 2011, ZIELÍNSKA *et al.*, 2007). Entretanto, de acordo com Yang *et al.* (2018) e Sproesser *et al.* (2017), métodos tradicionais de soldagem são, cada vez mais, incapazes de atender aos requisitos da indústria, o que aumenta a procura das empresas por novos métodos; mais eficientes e sustentáveis, com baixo custo e alta qualidade, que atendam às necessidades da produção moderna.

O setor de soldagem é constante alvo de investimentos tecnológicos na busca por maior produtividade e qualidade, visando reduzir custos e assegurar o cumprimento de requisitos em segurança e meio ambiente, o que impulsiona o desenvolvimento de novos processos e gera uma demanda por conhecimento (COSTA, 2011, COSTA *et al.*, 2012). Os avanços alcançados nas últimas décadas ocorreram principalmente devido ao desenvolvimento e aperfeiçoamento dos equipamentos utilizados em soldagem, que alcançou grande proporção com a evolução da eletrônica e do conhecimento obtido pela experiência em campo, bem como com a obtenção de novos materiais, que também impulsionam o mercado na busca de novas metodologias e soluções em soldagem (MATA, 2017).

Conforme Mvola; Kah; Layus (2018), durante as duas últimas décadas, o avanço da eletrônica permitiu um melhor controle e ajuste mais preciso das formas de onda de tensão e de corrente. Os autores ainda citam o controle sinérgico, a possibilidade de movimentos do eletrodo consumível e o desenvolvimento de curvas de corrente e tensão mais complexas como opções mais recentes, que ampliam as possibilidades para controle do processo.

A crescente necessidade de processos de soldagem que sejam capazes de agregar uma alta produtividade a um baixo custo, e permitir obtenção de cordões de solda com garantia de boa qualidade e aspecto superficial, aliado ao avanço tecnológico da computação, eletrônica e das fontes de energia utilizadas, impulsionou o uso e pesquisas do processo GMAW no intuito de desenvolver novos processos, chamados derivados, que melhorassem tanto as características operacionais como a qualidade da solda (MATA, 2017) (KAH; SUORANTA; MARTIKAINEN, 2013) (SILVA; DUTRA; JR, 2008). Segundo Silva; Dutra; Jr (2008), além

de inovações, processos já existentes foram reinventados e surgiram novas técnicas de controle do arco elétrico e da transferência de metal.

As melhorias no processo GMAW com transferência por curto-circuito, tanto em termos de procedimento e modalidade de processo como equipamentos, tem sido o alvo de pesquisa de Universidades, Institutos tecnológicos e fabricantes de equipamentos, e avanços como o aumento da resposta dinâmica de controle da corrente de soldagem e o ajuste contínuo de indutância na fonte foram possíveis graças ao advento da eletrônica de potência e controle. Esses avanços permitiram a concepção e o desenvolvimento de processos cuja transferência metálica é controlada (FOGLIATTO, 2013).

Como exemplo de processo derivado baseado no controle e ajuste da forma de onda da corrente pode-se destacar a tecnologia de soldagem por tensão superficial (do inglês *Surface Tension Transfer – STT*[®]), a qual foi desenvolvida pela *Lincoln Electric*, que obteve patente em 1988, e a partir de 1994 começou a comercializar equipamentos com esta tecnologia. A transferência por curto-circuito com controle da corrente de soldagem proporciona ao processo STT[®] diversas vantagens quando comparado ao GMAW convencional, dentre as principais destaca-se o controle do aporte térmico, a redução de descontinuidades e perda de material por respingo e uma melhoria no controle da transferência, que reflete tanto nas características operacionais do processo, como por exemplo a velocidade de soldagem, como também na geometria do cordão.

Os esforços de pesquisa empregados acerca desses processos, com transferência de metal controlada, têm sido na validação dos mesmos visando diversas aplicações industriais como, por exemplo, substituir os processos GTAW (do inglês *Gas Tungsten Arc Welding*) e SMAW (do inglês *Shielded Metal Arc Welding*) em construção e reparo de oleodutos e gasodutos (FOGLIATTO, 2013) (SILVA, 2005) (POSSEBON, 2009) (LATIFI, 2012) (SOEIRO; ROCHA; BRANDI, 2013). No entanto, conforme Kah; Suoranta; Martikainen (2013), as inovações relevantes nos processos de soldagem a arco não são amplamente conhecidas e tampouco utilizadas em seu potencial máximo.

Por ser o primeiro passe numa junta soldada, o passe de raiz requer uma excelente qualidade. Na soldagem de tubos de grande diâmetro e espessura do metal base, os processos mais comumente utilizados para o passe de raiz são o SMAW, utilizando arame de revestimento celulósico, ou o GTAW, sendo que os passes de preenchimento podem ser realizados por outros processos. Apesar da excelente qualidade, o uso desses processos requer um tempo relativamente elevado de soldagem. A fim de melhorar a produtividade e eficiência nessa

aplicação, pela redução de custo e tempo, o processo STT[®] pode ser aplicado (ADI; ISMAR; PETAR, 2016).

Os autores Mvola *et al.* (2014), compararam processos GMAW avançados com o convencional, aplicados à soldagem dissimilar, e destacaram o efeito significativo que o controle existente nos processos avançados exerce sobre as propriedades químicas, físicas e mecânicas da solda, como, por exemplo, tamanho da Zona Termicamente Afetada (ZTA), microestrutura e qualidade geral do cordão de solda.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência de dois gases, a saber C8 (92% argônio + 8% CO₂) e C25 (75% argônio + 25% CO₂), bem como a influência da variação dos parâmetros do processo de soldagem GMAW-STT[®] na qualidade, geometria e propriedades mecânicas do cordão de solda em aço ASTM A-36.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Analisar o processo GMAW-STT[®] em relação ao GMAW convencional;
- b) Realizar um planejamento de experimentos (DOE) que possibilite verificar relação entre as entradas e saídas do processo com um nível de confiabilidade de 95%;
- c) Analisar a influência dos parâmetros de processo nas características geométricas do cordão de solda e ZTA;
- d) Diferenciar os efeitos do uso do C8 e do C25 na soldagem com o processo STT[®];
- e) Analisar a influência do processo de soldagem e do gás na formação da ZTA;
- f) Analisar a influência do processo de soldagem e do gás nas respostas mecânicas de resistência à tração e microdureza da região soldada.

1.2 Justificativa

A busca pelo desenvolvimento e avanços em processos de soldagem, de modo a atender os requisitos de custo, segurança, eficiência e produtividade é constante, e nesse sentido sistemas automatizados desempenham um importante papel nas indústrias.

Segundo Chandrasekaran *et al.* (2019), à medida que aumenta a demanda pela automação industrial torna-se necessário modelar adequadamente as relações entre os parâmetros de processo e a geometria e desempenho da solda, visto que a possibilidade de prever a característica geométrica e as propriedades mecânicas do cordão permite aos engenheiros de soldagem maior controle do processo, o que economiza tempo e recursos no projeto de juntas soldadas.

A modelagem matemática dos processos de soldagem a arco envolve a solução de um problema complexo, multidisciplinar, que envolve muitos parâmetros e requer um conhecimento detalhado sobre as condições de contorno e propriedades do plasma de alta temperatura (CHANDRASEKARAN *et al.*, 2019). É uma tarefa difícil controlar e prever com precisão o perfil e a qualidade da solda, o que se deve à sua complexidade (ZIELIŃSKA *et al.*, 2007).

De acordo com Lopera (2010), a determinação adequada da configuração das variáveis em um processo de soldagem é uma condição importante para alcançar um cordão de qualidade e aparência desejadas, e tendo em vista a complexidade e grande correlação dos parâmetros de entrada, torna-se necessário desenvolver modelos, que podem ser empíricos ou experimentais, com capacidade de predição das respostas de interesse. Conforme Modenesi *et al.* (2011) a possibilidade de prever resultados da solda contribui para melhoria em qualidade, segurança operacional, diminuição de custos de fabricação e melhor entendimento das variáveis que afetam o processo.

Segundo Praveen; Yarlalagadda; Kang (2005), os modernos processos de soldagem são complexos e requerem conhecimento e ajuste cuidadoso de todos os parâmetros para obter melhor qualidade na solda. Os autores destacam a importância do controle efetivo dos parâmetros de corrente e tensão para um desempenho de maior qualidade.

Mvola; Kah; Layus (2018) afirmam que nas últimas décadas tem-se buscado a melhoria de juntas soldadas pela otimização de suas respostas em serviço, por meio do aumento de vida útil e confiabilidade. Os autores também relatam que há um aprimoramento constante dos processos de manufatura, assim como os processos de soldagem, no que diz respeito à não degradação das propriedades do metal base. Neste contexto, é que se apresenta o objetivo de

aprimoramento dos processos e a busca por condições de soldagem otimizadas para aumentar a rentabilidade das empresas, o qual deve partir da total compreensão de cada processo de soldagem, ademais das vantagens e desvantagens de cada um deles (HINCAPIÉ, 2015).

Para Malmuth *et al.* (1974), a integridade e confiabilidade da solda está fortemente relacionado à sua microestrutura e geometria, que são determinadas pela combinação e interação entre os diversos fatores do processo.

De acordo com Yang *et al.* (2018), são muitas as variáveis no processo de soldagem que afetam a forma do arco elétrico e conseqüentemente a transferência de metal durante a solda, o que tem impacto direto sobre a qualidade do cordão e eficiência do processo. Os autores afirmam que muitas pesquisas utilizando GMAW analisaram estabilidade da transferência e qualidade da solda por meio dos efeitos dos parâmetros e do gás de proteção. Segundo Kah *et al.* (2014), a compreensão do comportamento do arco e suas propriedades inerentes pode ajudar a melhorar a previsão e a qualidade da solda, assim como reduzir custos de processo. Conforme Cai *et al.* (2017a), o arco depende da composição do gás de proteção, e conhecer o efeito do gás no arco, bem como seu comportamento, é útil para garantir um controle preciso sobre a geometria e a qualidade do cordão de solda.

Os desenvolvimentos implementados implicam em uma maior complexidade devido ao aumento do número das variáveis do processo de soldagem, além da exigência de uma mão de obra mais especializada e aumento no custo dos equipamentos. A soldagem GMAW e suas variantes são um tema atual de interesse para fabricantes de equipamentos, consumíveis e usuários, desta forma, o interesse de fazer uma contribuição para a compreensão desses modos ao ser comparado com outros mais conhecidos se torna oportuno. Adicionalmente se percebe que há poucos estudos comparativos entre os diferentes modos de soldagem (HINCAPIÉ, 2015).

Somado a tudo que foi apresentado anteriormente, Filho (2014) chama a atenção para a escassez de informações sobre os processos derivativos, uma vez que toda a tecnologia advém de empresas estrangeiras e muitas das soluções conhecidas são restritas a aplicações já pré-definidas de fábrica, o que justifica ainda mais a busca de conhecimento e realização de pesquisas a respeito desses processos.

1.3 Delineamento do trabalho

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

O capítulo 1 é uma introdução acerca do tema proposto, onde são apresentados os objetivos e a justificativa em que se baseiam a presente pesquisa.

O capítulo 2 traz uma revisão da literatura, em que o estado da arte sobre o processo em estudo é apresentado.

O capítulo 3 descreve a metodologia adotada para o desenvolvimento do trabalho.

O capítulo 4 apresenta os resultados seguidos de suas análises e discussões.

O capítulo 5 contém as conclusões das análises, observações e discussões elaboradas durante o desenvolvimento da pesquisa.

Por fim, o último capítulo apresenta o referencial bibliográfico utilizado em todo o decorrer da investigação científica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Soldabilidade dos aços ao carbono

De acordo com Moreira (2008) os teores de C e Mn, e os níveis de impurezas, determinam a soldabilidade dos aços ao carbono. Aços ao carbono com percentual de carbono de até 0,15% apresentam excelente soldabilidade por não serem temperáveis. Já os aços ao carbono cujo percentual de carbono esteja entre 0,15% e 0,30% são considerados de boa soldabilidade, no entanto a possibilidade de endurecimento exige precauções.

Conforme ASM (1993) entende-se por soldabilidade a capacidade que um material apresenta, ao ser soldado, de manter as propriedades da solda e da ZTA próximas ou muito parecidas com as propriedades do metal de base (MB). Assim, quanto melhor a soldabilidade de um material, menos diferença será notada nessas regiões, ao passo que se a soldabilidade é ruim, haverá uma degradação das propriedades do metal de base para o metal de solda ou metal de adição (MA). O conceito de soldabilidade também diz respeito a soldar sem queda de desempenho e sem ocorrência de trincas e defeitos.

Os aços ao carbono estão entre os metais de melhor soldabilidade. No entanto, dependendo da composição química, dos procedimentos/parâmetros de soldagem empregados e da taxa de resfriamento pode se tornar susceptível a um ou mais problemas de soldabilidade, dentre eles a porosidade e as trincas induzidas por hidrogênio, ou trincas a frio, que são o mais sério problema de soldabilidade dos aços ao carbono (MOREIRA, 2008).

Porosidades em metais de solda de aços ao carbono podem ser resultantes de uma excessiva quantidade de gases como monóxido de carbono, dióxido de carbono, nitrogênio, hidrogênio e oxigênio na região da poça de fusão. A presença de monóxido de carbono no metal de solda pode ser resultado tanto da reação entre o oxigênio com o carbono contido na poça de fusão quanto pela reação entre o dióxido de carbono e o oxigênio. É extremamente comum a utilização de consumíveis de soldagem com adições de elementos químicos desoxidantes tais como Si e Al (MOREIRA, 2008).

As condições superficiais do metal base também podem alterar o nível de porosidades. A presença de óxidos de ferro na superfície a ser soldada adiciona oxigênio à poça de fusão. Assim, se torna uma boa prática a limpeza superficial antes de se realizar a soldagem. A presença de hidrogênio também é causadora de porosidades no metal de solda, principalmente quando se combina com S presente no aço (MOREIRA, 2008).

A trinca a frio está relacionada com três fatores: a presença do hidrogênio na solda, uma microestrutura martensítica de alta dureza, característica de aços ao carbono temperáveis, e tensões de soldagem (MOREIRA, 2008).

O ASTM A-36 apresenta baixo percentual de carbono e não contém outros elementos que conferem temperabilidade, o que o torna não suscetível a trincas a frio. Por não ser temperável e apresentar, portanto, uma excelente soldabilidade é que o aço ASTM A-36 foi escolhido para esta pesquisa.

2.2 Processo GMAW

O processo de soldagem GMAW é um dos processos industriais de união mais comumente utilizados (OLIVEIRA; SANTOS; MIRANDA, 2020). Na indústria automotiva é muito utilizado na união de estruturas e em estações de reparo (WANG *et al.*, 2014). É o processo mais amplamente utilizado nas linhas de produção automatizadas e robotizadas de soldagem a arco (WU; CHEN; LI, 2004) (OLIVEIRA; SANTOS; MIRANDA, 2020).

Liskevych (2010) destaca o processo GMAW como o método de união de maior ascensão e utilização dentro da indústria. Em aplicações que requerem elevada taxa de deposição, como a soldagem de recuperação de turbinas hidráulicas, o processo GMAW é muito utilizado. Neste caso, utiliza-se um material de baixo custo e fácil usinagem, como o arame maciço a base de aço-carbono AWS ER70S-6, para recuperação e posteriormente é feita a soldagem de revestimento utilizando materiais mais nobres (MOREIRA, 2008).

A Figura 1 ilustra o processo GMAW.

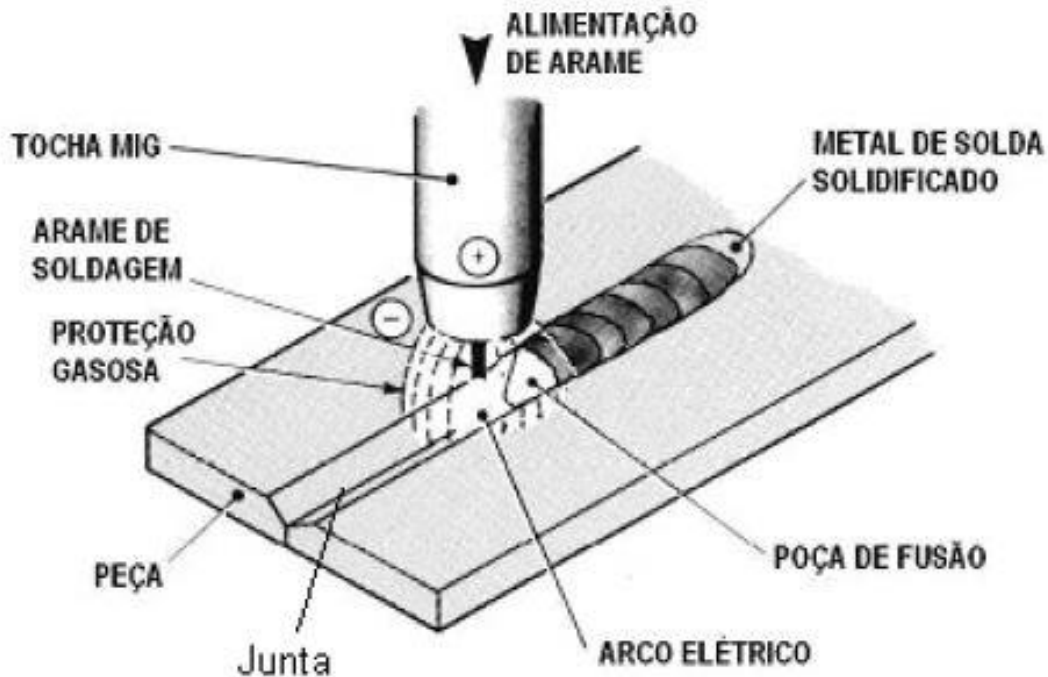


Figura 1- Processo de Soldagem GMAW (FORTES; VAZ, 2005)

Esse processo utiliza como fonte de calor um arco elétrico que se estabelece entre o eletrodo no consumível e a superfície do MB, com a função de fundir o material do arame e transferi-lo para a peça (CHANDRASEKARAN *et al.*, 2019). É um processo que utiliza uma fonte externa de gás de proteção para evitar que a poça de fusão sofra contaminação do ar externo (BARBEDO, 2011).

GMAW é definido como um processo de soldagem que utiliza um arco elétrico entre o arame eletrodo, de alimentação contínua, e a poça de fusão, e cuja proteção gasosa externa é feita sem aplicação de pressão (O'BRIEN, 2004). O sistema, que consiste basicamente de um arame eletrodo consumível, o gás de proteção e a peça de trabalho, quando energizado ioniza o gás e gera um arco elétrico, o qual aquece e funde o metal de adição formando gotas líquidas que se transferem à peça, também aquecida, para gerar a solda (WANG *et al.*, 2014).

Devido a ação do gás de proteção, o processo GMAW é adequado à soldagem de aços-carbono, aços de baixa, média e alta liga, aços inoxidáveis, alumínio e suas ligas, magnésio e suas ligas, cobre e suas ligas, aços de baixo carbono e aços de baixa liga (BARBEDO, 2011).

O processo de soldagem GMAW pode ser utilizado para soldar diversos tipos de metais, ferrosos ou não, e em qualquer posição. Todos os materiais comercialmente importantes, tais como aços-carbono, aços de alta resistência e baixa liga (do inglês *High Strength Low Alloy*

steel – HSLA), aço inoxidável, alumínio, cobre, titânio e ligas de níquel podem ser soldados em todas as posições de soldagem, desde que seja feita a escolha apropriada do gás de proteção, eletrodos e demais variáveis do processo. Somado a isso, o processo em questão pode ser empregado de diferentes maneiras: mecanizado, automático, semi-automático e até mesmo robotizado (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2017) (NASCIMENTO, 2015) (BARBEDO, 2011) (MACHADO, 1996).

A soldagem com arames maciços não apresenta escória e a produção da poça de fusão é totalmente dependente do gás de proteção e soldas realizadas com arames sólidos geram alta penetração, porém estreita, do tipo dediforme (*finger*) (BARBEDO, 2011).

O processo de soldagem funciona com corrente contínua (CC), normalmente na polaridade reversa (arame no positivo). São empregadas correntes de 50A até 600A e tensões que variam de 15 a 32V (FORTES; VAZ, 2005). As fontes de energia de GMAW trabalham com saída de tensão nominal constante, o que resulta em uma alta disponibilidade de corrente de curto-circuito (NORRISH; CUIURI, 2014).

Para a soldagem GMAW convencional, em transferência por curto-circuito, (do inglês *GMAW Shorting Process* ou GMAW-S) as formas de onda da tensão e da corrente, no tempo, são apresentadas na Figura 2.

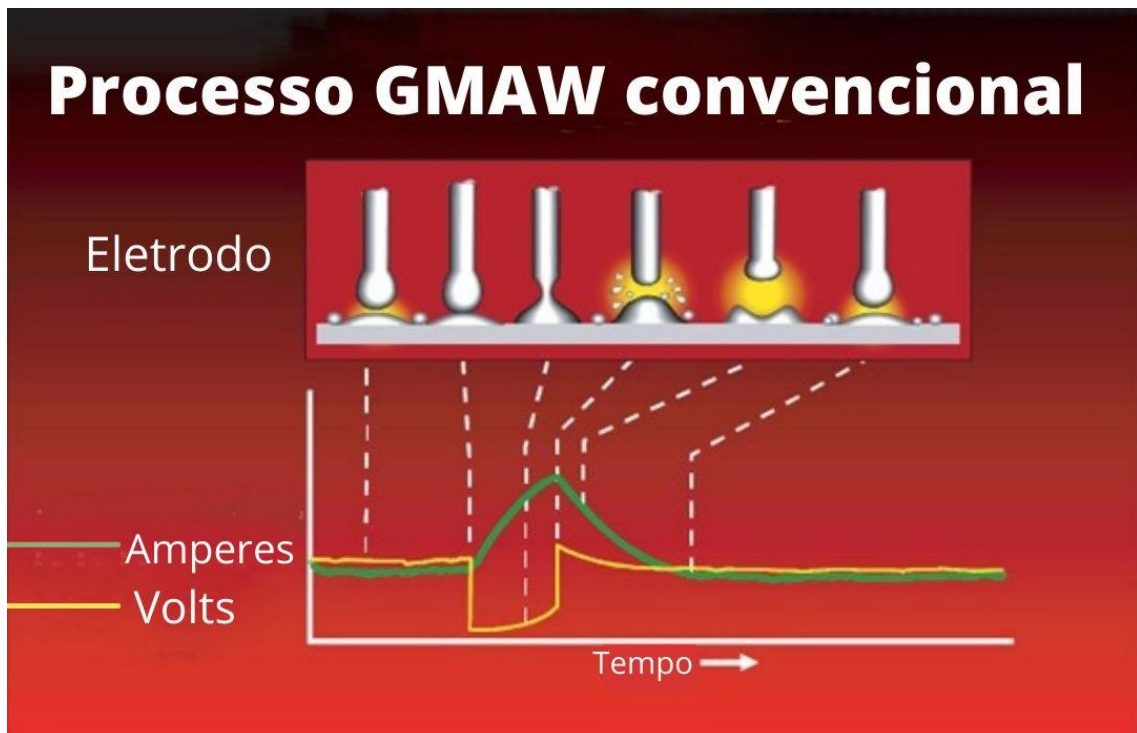


Figura 2- Processo Curto-circuito convencional (Adaptado de DERUNTZ, 2003)

No processo GMAW o operador regula a velocidade de alimentação de arame e a tensão média, de acordo com a quantidade de energia necessária à aplicação – conforme o tipo de junta, espessura da chapa, tamanho e tipo do eletrodo, material e gás de proteção (DERUNTZ, 2003).

2.2.1 Variáveis do processo

O processo GMAW é influenciado por diversas variáveis, que afetam tanto aspectos operacionais do processo como as propriedades mecânicas e metalúrgicas da solda (SOUZA; RESENDE; SCOTTI, 2009). Pode-se destacar a intensidade da corrente elétrica, polaridade, tensão do arco, tipo de preparação da junta, posição, diâmetro e comprimento energizado do eletrodo (*stick-out*), as características do gás de proteção, velocidade de soldagem e de alimentação do arame, dentre outros (CAMPOS, 2005) (BARBEDO, 2011). Liskevych & Scotti (2014) enfatizam a importância da atmosfera protetora no comportamento do processo, uma vez que exerce influência na estabilidade do arco, na formação das gotas em transferência e na aparência e geometria do cordão de solda.

Mvola; Kah; Layus (2018), mencionam a influência de diversas variáveis na geometria da solda, como a polaridade, a distância entre o bico de contato e a peça de trabalho (DBCP), o tipo e diâmetro do arame eletrodo, tipo da transferência metálica, velocidade de soldagem, a corrente e a tensão; e destaca o efeito significativo exercido pelo gás de proteção. Ainda segundo os autores, o perfil geométrico do cordão afeta significativamente a vida útil da junta soldada, e pequenas variações nos parâmetros do processo podem afetar muito na qualidade final da solda.

Conforme Chandrasekaran *et al.* (2019), os principais parâmetros do processo GMAW, entre eles velocidade de alimentação do arame, tensão, velocidade de deslocamento e tipo de gás, influenciam não somente a geometria do cordão produzido, mas também o modo de transferência metálica, a estabilidade do arco e a qualidade da solda. Zielińska *et al.* (2007) também citam a importância do gás de proteção, bem como das composições químicas do metal de base e de adição. Segundo Souza; Resende; Scotti (2009), o modo de transferência e a morfologia do cordão são dependentes da composição do gás de proteção.

A corrente elétrica influencia diretamente a taxa de deposição, o modo de transferência metálica e as características geométricas do cordão. Portanto, sua escolha dependerá da espessura das peças a serem unidas, do diâmetro do eletrodo e das características desejadas dos cordões de solda. Além disso, uma corrente de baixa intensidade pode ocasionar pouca

estabilidade ao arco elétrico (BARBEDO, 2011). No processo GMAW a corrente de soldagem está diretamente relacionada à velocidade de alimentação do arame (desde que a extensão do eletrodo seja constante). Quando a velocidade de alimentação do arame é alterada, a corrente de soldagem varia no mesmo sentido (GIRALDO *et al.*, 2009).

O parâmetro de tensão, tão importante na soldagem, exerce influência tanto no comportamento do arco, como a estabilidade e rendimento do processo, o modo de transferência e a geometria do cordão de solda. A tensão determina diretamente o comprimento do arco que controla o perfil do cordão, a profundidade da penetração e a quantidade de respingos. A penetração aumenta com a diminuição da tensão. O aumento do comprimento do arco, gerado com o aumento da tensão, resulta em maior probabilidade de ocorrência de porosidade e de mordeduras (BARBEDO, 2011; GOMES, 2006).

A velocidade de deslocamento da tocha, ou velocidade de soldagem, representa a taxa linear em que o arco se move ao longo da junta de solda. Pode-se observar que a penetração, primeiro aumenta e depois diminui com o aumento da velocidade de soldagem, sendo máxima para velocidades intermediárias. Quando a velocidade é muito baixa, a quantidade de material depositado por unidade de comprimento da solda aumenta, a poça de fusão fica com dimensões elevadas e o calor do arco atua diretamente na poça e não no metal de base, fazendo com que a penetração seja baixa. Por outro lado, para velocidades de soldagem muito altas, a quantidade de calor transferida por unidade de comprimento é reduzida e a penetração também diminui, podendo ocorrer ainda mordeduras ao longo do cordão (MIRANDA, 1999, apud BARBEDO, 2011, p. 16).

Aloraier *et al.* (2012) pesquisaram a influência dos parâmetros de soldagem na geometria do cordão e afirmam que a largura do cordão aumenta com o aumento da tensão de soldagem e diminui com o aumento da velocidade de soldagem. Lima II *et al.* (2005) estudaram um modelo matemático para a soldagem GMAW com o objetivo de relacionar parâmetros mensuráveis, como tensão, corrente, velocidade de soldagem e largura da poça de fusão, com parâmetros geométricos (penetração, reforço, e larguras do cordão e da ZTA) e assim eliminar a utilização dos ensaios destrutivos. Seus resultados mostraram que a tensão tem influência significativa sobre a profundidade e a altura do cordão, a corrente tem influência marcante sobre a largura da ZTA e a velocidade de soldagem influencia fortemente a largura do cordão.

Há ainda outras variáveis importantes dentro do processo, como a DBCP e a polaridade da corrente, os quais foram mantidos fixos neste trabalho e o gás de proteção, tão importante na soldagem e cujas propriedades e contribuição para os resultados da solda serão discutidos mais à frente.

Quando a distância do bico de contato à peça é muito grande, pode ocorrer uma deficiência na ação do gás de proteção. Para uma taxa de alimentação fixa do arame, qualquer aumento desta distância reduz a corrente fornecida pela fonte. O aumento da DBCP pode provocar um aumento significativo do reforço do cordão de solda e diminuição da largura do cordão. Esta tendência é mais pronunciada para a soldagem com o CO₂ puro (SALES, 2001, apud BARBEDO, 2011, p. 16).

Conforme Mvola; Kah; Layus (2018), o eletrodo em polaridade reversa (positivo), na soldagem de filete, tende a apresentar um perfil de solda com tamanho de perna mais extenso, penetração mais profunda e com formato *finger* e uma face de solda mais baixa, enquanto o eletrodo em polaridade direta (negativo) geraria uma face de solda mais alta e uma penetração mais rasa e arredondada.

O processo GMAW é caracterizado pela forte interdependência das suas variáveis e pela grande sensibilidade à variação das mesmas (MODENESI *et al.*, 2011, MARQUES; MODENESI, 2014). Uma vez que as variáveis não são completamente independentes, para produzir os resultados desejados pode não ser suficiente realizar mudanças em apenas uma delas, assim é necessário alterar outras para produzir bons resultados. A correta seleção dos parâmetros requer considerável habilidade e experiência, uma vez que os valores ótimos são afetados por diversos fatores como o tipo do metal base, a composição do arame, a posição da tocha de soldagem, os requisitos de qualidade, e as variáveis de entrada (controláveis) da máquina de solda. Logo, não há uma mudança única nos parâmetros que proporcione um resultado considerado ótimo para todos os casos, e torna-se primordial conhecer e controlar tais variáveis para que seja possível obter soldas cuja qualidade seja satisfatória à aplicação desejada (VIEIRA, 2006, apud BARBEDO, 2011, p. 8).

As variáveis do processo determinam as características finais do cordão de solda, como dimensões, acabamento e propriedades mecânicas. Definem também a maior ou menor probabilidade de ocorrência de alguns tipos de defeitos, como trincas, poros, mordeduras e outros. Dimensões inadequadas do cordão de solda podem contribuir para falha de uma estrutura soldada, pois a penetração determina a capacidade de carga de tensão de uma junta soldada. Cada uma dessas variáveis pode ser controlada separadamente, apesar de que o efeito de uma está diretamente relacionado com a atuação da outra (SMAT, 1986, apud BARBEDO, 2011, p. 15).

2.2.2 Transferência Metálica

A obtenção de uma solda de qualidade está associada ao modo como o material é transferido para a poça de fusão, ou seja, o tipo de transferência metálica. O processo de transferência de metal durante a soldagem desempenha um papel significativo na estabilidade do arco elétrico e na qualidade da solda (WU; CHEN; LI, 2004).

Dentre as características fundamentais de operacionalidade e eficiência do processo, estão os modos de transferência do metal de adição, pois afetam a habilidade de soldar em várias posições, a profundidade do cordão, a estabilidade da poça de fusão e a quantidade de respingos (SUBRAMANIAM *et al.*, 1998). Sendo uma das características mais importantes em um processo de soldagem a arco elétrico, o modo de transferência tem grande influência em algumas respostas de processo, tais como a eficiência de deposição, a qualidade estética e estrutural da solda, a geometria do cordão e a taxa de calor adicionada ao metal de base, entre outros aspectos (SILVA; DUTRA; JR, 2009a).

Em todos os processos de soldagem pode-se observar os modos de transferência, que são determinados pelos diversos parâmetros do processo, tais como polaridade da corrente, tensão, material de base e adição, gases, DBCP, fonte de potência, dentre outros (VILARINHO, 2007, apud NASCIMENTO, 2015, p. 34). A transferência do metal depende de diversos fatores, tais como o gás de proteção, a intensidade da corrente elétrica, da tensão do arco, do comprimento, diâmetro, velocidade de alimentação e da composição química do eletrodo (CAMPOS, 2005, ZIELINSKA *et al.*, 2008, RAO; LIAO; TSAI, 2010).

Para Scotti & Ponomarev (SCOTTI; PONOMAREV, 2008), no processo GMAW estão presentes duas classes principais de modos de transferência, a saber, naturais e controlados. A classe de modo de transferência natural compreende a transferência metálica que varia de acordo com o nível de corrente e tensão parametrizados no processo, segundo um mapa de transferência (Figura 3), e se divide em dois grupos distintos – por contato, em que a gota toca a peça antes do destacamento, e por vôo livre, sem contato. Por sua vez o modo controlado de transferência, são os modos naturais obtidos de forma proposital e dominada segundo o formato de onda da corrente originado na fonte. De acordo com Costa (2011), o modo controlado diz respeito a sistemas de controle eletrônicos e/ou mecânicos que monitoram e controlam a intensidade da corrente durante a transferência metálica, modificando o formato de onda conforme as imposições do arco elétrico.

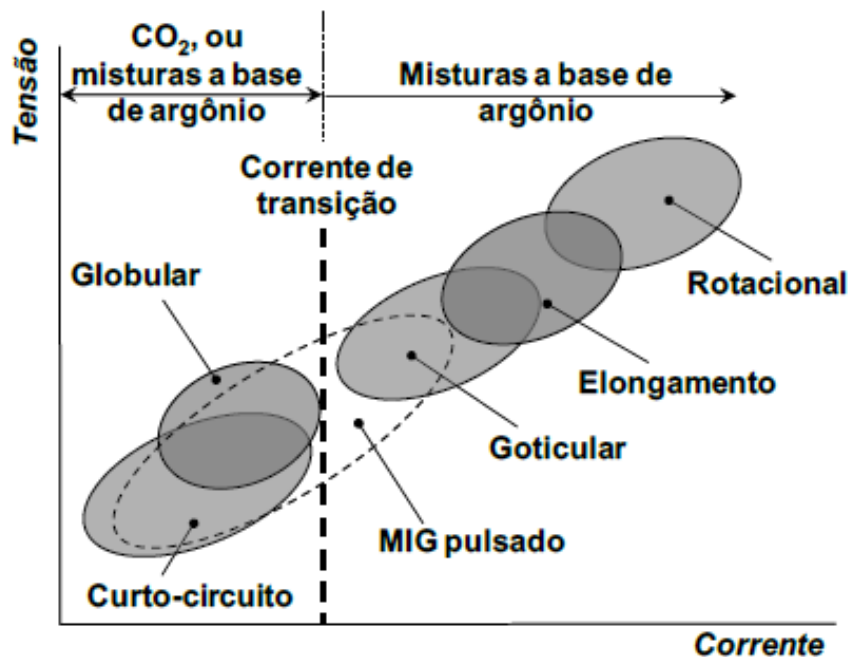


Figura 3- Mapa de Transferência Metálica – Adaptado de Vilarinho 2007 (Nascimento 2015)

O presente trabalho se propõe ao estudo e pesquisa de um processo cuja transferência metálica é controlada e ocorre no modo curto-circuito. Portanto, ater-se há a esse tipo de transferência, tanto na condição natural quanto controlada, já os demais modos não serão discutidos.

2.2.2.1 Transferência por curto-circuito

Arco curto, curto-circuito ou transferência por mergulho é uma variante do processo GMAW, a qual opera em baixo nível de tensão e corrente, geralmente 30 a 200A e 15 a 22V, e produz baixa entrada de calor, se comparado aos outros tipos de transferência, o que resulta em uma poça de fusão relativamente pequena e de rápida solidificação, sendo adequado para soldagem de chapas finas ou espessas em todas as posições (NORRISH; CUIURI, 2014) (HERMANS; OUDEN, 1999) (MACHADO, 1996).

Segundo Wilhelm *et al.* (2010) a transferência da gota acontece a cada fase de curto do ciclo e este modo é geralmente usado para arames de 0,8 a 1,2 mm de diâmetro, sendo interessante para soldagem em qualquer posição de chapas finas e passe de raiz em materiais de maior espessura.

O material é transferido para a peça por meio do contato regular do arame com a poça de fusão, portanto não ocorre transferência de material pelo arco elétrico (QUITES, 2002, apud

BARBEDO, 2011, p. 13, QUITES, 2002, apud CAMPOS, 2005, p. 8, ZIELINSKA *et al.*, 2008, HERMANS; OUDEN, 1999). A taxa de alimentação do arame consumível deve ser tal que exceda levemente a sua taxa de fusão, que ocorre pelo efeito combinado do calor resistivo e do arco. O resultado é uma gradativa aproximação da ponta do eletrodo e a poça de fusão até seu mergulho na poça e conseqüente geração do curto-circuito (NORRISH; CUIURI, 2014).

A transferência por curto-circuito corresponde a um dos modos de transferência mais usuais na construção de estruturas metálicas (CABRAL *et al.*, 2015, CABRAL *et al.*, 2013). Embora existam limitações, esse tipo de transferência possui boa capacidade para preenchimento de raiz e boa tolerância a variações (NORRISH; CUIURI, 2014). No modo convencional da transferência por curto-circuito, o arame eletrodo é depositado em frequências que podem variar de 20 a mais de 200 Hz (WEMAN; LINDÉN, 2006) (MACHADO, 1996).

De acordo com Norrish & Cuiuri (2014), os eventos que acontecem durante um único ciclo no modo de transferência por curto-circuito, ocorrem em um período de 10ms (frequência de 100 a 150 Hz), do qual somente 2ms correspondem ao tempo de curto. A frequência da transferência e os tempos associados a cada evento não são fixos, variam de forma estatística e dependem da velocidade do arame e das características estáticas e dinâmicas da fonte de energia.

A Figura 4 mostra o esboço dos sinais de tensão e corrente no tempo para a transferência por curto-circuito, cujas etapas principais são indicadas pelos pontos A a E.

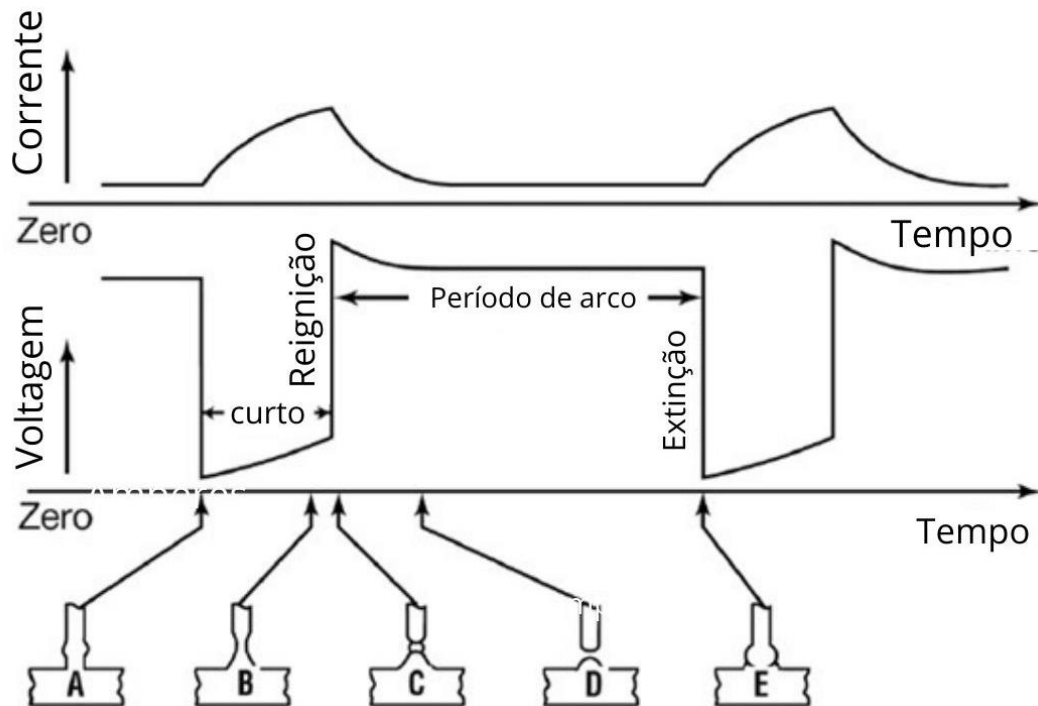


Figura 4- Sinais de corrente e tensão no tempo para a transferência por curto-circuito (Adaptado de WILHELM *et al.*, 2010)

O curto ocorre entre A e C, período em que o eletrodo tem contato físico com a poça de fusão. Nesse período a tensão tende a zero e a corrente tende ao seu nível máximo, em C, sendo a indutância da fonte a característica responsável pela taxa de crescimento da corrente. No instante em que a corrente atinge seu último nível, o efeito *Pinch* é máximo e contribui para o destacamento e transferência da gota líquida (WILHELM *et al.*, 2010).

Segundo (CHOI *et al.*, 1998), quando a gota líquida toca a poça de fusão, o arco se extingue e há um aumento abrupto da corrente devido à diminuição da resistência. A corrente de pico alcançada na fase de curto é determinada, principalmente, pela indutância do circuito secundário (NORRISH; CUIURI, 2014).

Wilhelm *et al.* (2010) afirmam que o problema do modo de transferência por curto-circuito é a geração de respingos, que acompanha o rompimento da ponte líquida durante o curto, e acrescentam que para minimizar o problema é necessário o controle da fase de curto durante a transferência, o que foi possível graças ao desenvolvimento de modernas fontes de soldagem que permitem reduzir a corrente antes do rompimento da ponte líquida pela variação de indutância e geração de uma contra tensão.

Dutra & Silva (2008) concordam que a produção elevada de salpicos seja um dos problemas da transferência por curto-circuito, e ainda citam a dificuldade em se obter adequado controle de passe de raiz no fundo de chanfros, uma vez que a corrente média varia quando a

tocha se desloca lateralmente à junta, como outra grande dificuldade do processo, devido ao fator limitante da não possibilidade de atuar diretamente na corrente de soldagem.

A Figura 5 apresenta a geração de respingos que acontece na transferência por curto-circuito do processo GMAW.



Figura 5- Geração de respingos em Transferência por curto-circuito convencional (WILHELM *et al.*, 2010)

Comparado ao modo de transferência por spray, o curto-circuito convencional tem elevada incidência de salpicos e o cordão possui acabamento com aparência irregular, principalmente quando se utiliza uma proteção rica em CO₂ (ZHU; WU; CHEN, 2007).

A transferência por curto-circuito é recomendada para aplicações que requerem baixa ou média entrada de calor, porém caracteriza-se pela presença indesejável de respingos. Os respingos ocorrem pela ação de um elevado nível de corrente de *Pinch*, a qual é responsável pela separação da gota de metal líquido, na ordem de 100 vezes por segundo enquanto a máquina tenta manter a tensão média ajustada (DERUNTZ, 2003).

2.2.2.2 *Transferência controlada*

As primeiras fontes de energia do processo GMAW, por não permitir controle efetivo sobre a transferência do metal, limitavam a utilização deste processo em várias aplicações dentro da indústria, inclusive na soldagem de componentes estruturais de alta responsabilidade (JÚNIOR, 2002). Porém, a relativa facilidade de automatizar este processo, aliado à sua maior produtividade e avanços obtidos pelas pesquisas, como o controle da transferência de metal (transferência controlada), levaram a uma maior aceitação deste por parte das indústrias (FOGLIATTO, 2013).

Segundo (WILHELM *et al.*, 2010) os processos de arco curto controlado, os quais são derivados do GMAW, são utilizados para reduzir a entrada de calor na peça de trabalho. A baixa

entrada de calor contribui para uma menor distorção na peça de trabalho. De acordo com Mvola *et al* (2014), o preciso controle do aporte térmico possibilita uma melhor gestão e controle de pós-tratamentos térmicos.

Aliado às vantagens já conhecidas do processo GMAW, novas fontes têm sido desenvolvidas para melhorar a transferência metálica, proporcionar menor aporte térmico e diminuir os níveis de fumos e respingos gerados pelo processo. O processo derivativo STT[®] é um exemplo de desenvolvimento em fontes de soldagem que visa a melhoria do controle do processo e garantia de maior qualidade.

De acordo com Costa (2011), as fontes controladas requerem ajuste de parâmetros que até então não existiam no processo convencional, sendo o conhecimento desses de vital importância para a qualidade da junta soldada. O autor ainda destaca o quão necessário é esse conhecimento se basear em uma abordagem real, e não somente comercial, das vantagens e limitações de cada uma das fontes de energia.

Diversas empresas comercializam fontes de soldagem que aplicam a transferência por curto-circuito controlada. Na maioria das fontes comercializadas o controle de transferência que é realizado consiste basicamente em monitorar os sinais de tensão e corrente, e na iminência do curto-circuito e do destacamento da gota, forçar uma redução do nível de corrente, conseqüentemente das forças envolvidas na transferência, de forma que garanta que a gota, devido ao efeito da tensão superficial, seja suavemente admitida para dentro da poça de solda, eliminando salpicos (CAIMACAN; MISHCHENKO; SCOTTI, 2016). Conforme Costa (2011), neste cenário de diversas tecnologias de fontes que controlam a transferência é importante estabelecer, cientificamente, as vantagens e limitações.

Nascimento (2015) estudou a soldagem de dutos de aço-carbono por meio do processo GMAW convencional e STT[®], onde investigou parâmetros de soldagem para passe de raiz e de enchimento. Os resultados indicaram que somente no processo STT[®] foi possível estabelecer um conjunto robusto de parâmetros para os dois passes propostos, enquanto no convencional só o passe de raiz foi realizado com êxito.

A análise feita por Mvola; Kah; Layus (2018) mostra que nos processos de soldagem GMAW por curto-circuito controlado (*CS-GMAW – controlled short-circuit gas metal arc welding*) todos os parâmetros contribuem para controle da entrada de calor na solda e redução da quantidade de respingos e fumos gerados.

Os sistemas controlados de transferência por mergulho operam de forma estável, livre de respingos e fornecem algum grau de controle das condições de curto-circuito e arco elétrico. A frequência dos curtos é menor em comparação com o sistema convencional, o que permite

maior aquecimento do arco e maior resistência a defeitos de fusão, devido à menor ocupação do evento de curto no tempo do ciclo. Outro benefício atingido pelo controle da transferência é a resistência melhorada nas soldas de abertura de raiz (NORRISH; CUIURI, 2014).

Existem cerca de 10 processos variantes da soldagem por imersão controlada. Todos eles oferecem não somente uma transferência por curto-circuito estável e com poucos respingos, mas permitem que isso seja alcançado em frequências de mergulho mais baixas, favorecendo o aquecimento da peça de trabalho, que é uma limitação do processo convencional. As características de possibilidade de soldar em várias posições e soldar chapas finas com correntes médias de 40 a 180A, vistas no processo convencional, são mantidas no controlado. (NORRISH; CUIURI, 2014)

Muitas comparações investigativas foram conduzidas nas diversas variantes de controle de curto-circuito e transferência pulsada, como no trabalho de Pépe (2010). A conclusão geral é que todos os processos variantes proporcionam melhor controle, característica de fusão, excelente controle do passe de raiz e menor entrada de calor. Infelizmente, os vários sistemas comercializados, com nomes distintos e performances diferentes, tem encontrado resistência por parte dos usuários da indústria em aceitar o fato de que todos os sistemas melhoram a resistência à falta de fusão. Muitas empresas importantes, no entanto, adotaram o processo de curto-circuito controlado para uma variedade de aplicações críticas como raiz de passe único em aços-carbono e tubos austeníticos. (NORRISH; CUIURI, 2014).

2.2.2.3 *Forças que atuam na transferência*

Na soldagem a arco elétrico, a fusão do arame eletrodo origina gotas metálicas que são direcionadas à poça de fusão pelo resultado da combinação das seguintes forças: gravitacional (F_g), força de arraste dos gases (F_d), eletromagnética (F_{em}), força devido à tensão superficial (F_{ts}) e de vaporização (F_v). Conforme ilustrado pela Figura 6, as três primeiras (F_g , F_d e F_{em}) são forças que atuam no sentido do destacamento da gota, enquanto as forças de vaporização (F_v) e de tensão superficial (F_s) atuam na sua retenção. Com o aumento da corrente elétrica F_{em} aumenta e F_d e F_g diminuem (MVOLA; KAH; LAYUS, 2018) (OLIVEIRA; SANTOS; MIRANDA, 2020).

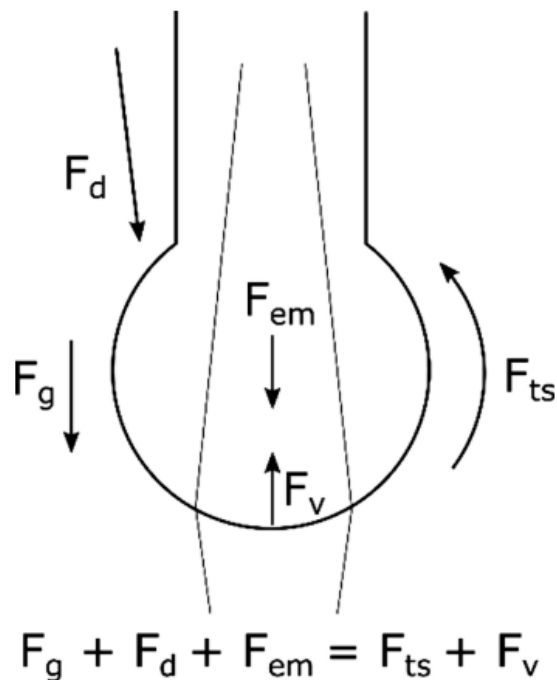


Figura 6- Forças que atuam na gota em transferência (OLIVEIRA; SANTOS; MIRANDA, 2020)

Para conhecer bem o processo é necessário entender as forças envolvidas na transferência. O metal líquido transferido para a peça é submetido, e responde, à ação dessas diversas forças, as quais atuam também sobre a poça de fusão e exercem considerável influência no resultado da solda, contribuindo para determinar características como o modo de transferência de metal e a penetração do cordão (SILVA; DUTRA; JR, 2009a).

Existem duas forças predominantes agem na ruptura do curto-circuito e na transferência do metal para a poça de fusão; a força eletromagnética e a força devido à tensão superficial. A força de estrangulamento eletromagnética é proporcional ao quadrado da corrente (NEMCHINSKY, 1996) e para altas densidades de corrente essa força espremerá a ponte líquida que conecta o arame e a poça de fusão. Quando a ponte líquida está suficientemente estreita o curto se desfaz e o arco elétrico é restabelecido, enquanto a força devido à tensão superficial puxa a gota para dentro da poça líquida e uma nova gota começa a se formar na ponta do eletrodo (SILVA; DUTRA; JR, 2009b).

A força de Lorentz, como também é conhecida a força eletromagnética, desempenha papel fundamental na transferência de calor e na penetração, sendo a corrente elétrica o parâmetro mais importante na determinação dessa resposta, uma vez que maiores densidades de corrente aumentam a força eletromagnética e produzem um cordão com maior penetração (KOU, 2003, CHANDRASEKARAN *et al.*, 2019).

Quando há a passagem de corrente elétrica por um condutor, gera-se ao redor desse um campo magnético. No processo GMAW, as forças eletromagnéticas vindas deste campo, e que são proporcionais ao quadrado da corrente, afetam o modo de transferência metálica. O termo mais comum atribuído a essas forças é Efeito *Pinch*. À medida que a gota fundida se forma na ponta do eletrodo, esta é espremida uniformemente da extremidade para o centro, pela ação dessas forças, como pode ser visualizado pela Figura 7. O tamanho da gota, por sua vez, depende da intensidade da força, da corrente e do gás de proteção (ARMAO *et al.*, 2014).

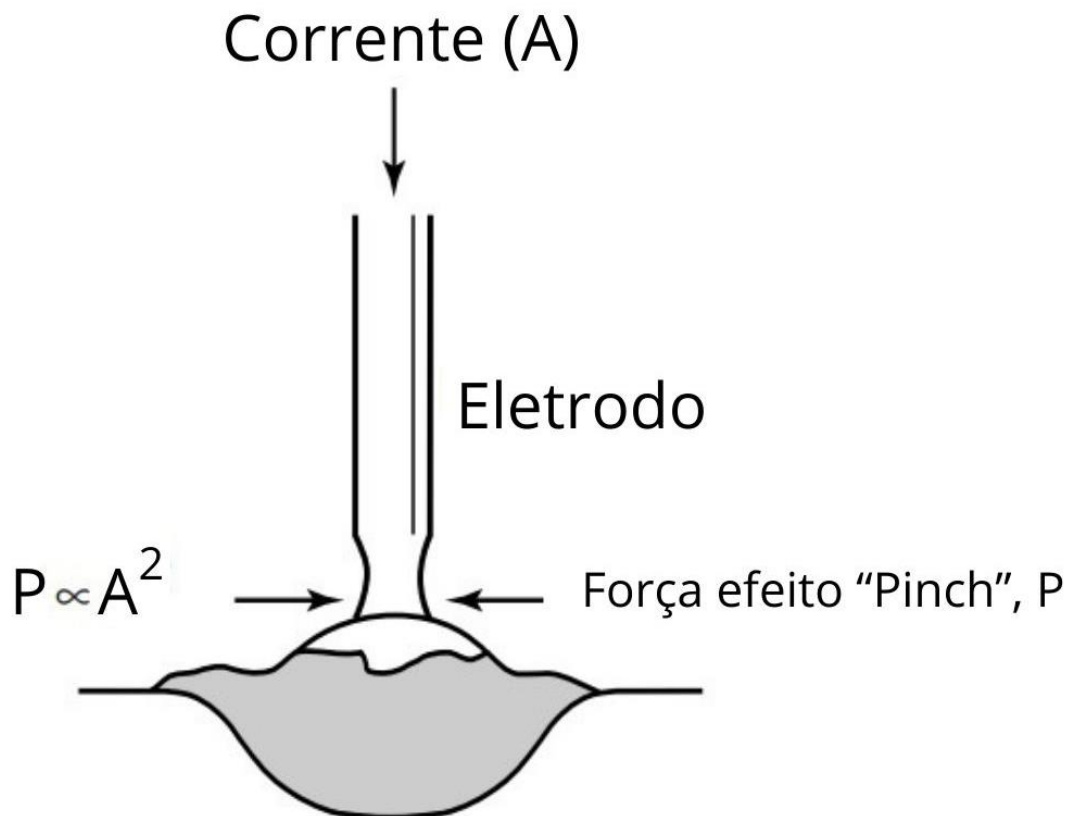


Figura 7- Efeito Pinch (Adaptado de ARMAO *et al.*, 2014)

Conforme Mvola; Kah; Layus (2018) os modelos matemáticos combinados com experiências práticas têm sido utilizados para encontrar dados adequados que promovam uma transferência de metal eficiente. Além disso, as análises estáticas e dinâmicas acerca da formação das gotas no processo de soldagem, melhoraram o entendimento do fenômeno associado à transferência, conduzindo ao desenvolvimento de modelos que a explicam.

Há na literatura uma quantidade considerável de trabalhos que abordam os modelos de transferência, que são divididos em dois mecanismos distintos segundo duas principais teorias (KIM; EAGAR, 1993) (WU; CHEN; LI, 2004). Um deles é a teoria de equilíbrio das forças estáticas, a qual sugere que o destacamento da gota de metal líquido da ponta do eletrodo e sua

transferência para a poça de fusão ocorre quando as forças que agem favoráveis ao destacamento da gota superam as forças que atuam na sua retenção (GREENE, 1960) (WASZINK; GRAAT, 1983). O outro mecanismo faz menção à possibilidade de a transferência de metal ocorrer devido a uma instabilidade, uma perturbação que se comporte em crescimento exponencial, por isso conhecida como teoria da instabilidade *Pinch* (ALLUM, 1985a, 1985b) (LANCASTER, 1999).

2.2.3 Vantagens e Desvantagens

São vantagens da soldagem GMAW: alto fator de trabalho do soldador, alta taxa de deposição, resultando em alta produtividade e qualidade da solda produzida (BARBEDO, 2011). Para (MOREIRA, 2008) e (LISKEVYCH, 2010) além da alta produtividade, a possibilidade de soldar uma ampla faixa de espessuras, soldar em todas as posições, bom acabamento e a facilidade de automatização são as principais vantagens do processo.

Barbedo (2011) e Machado (1996) citam várias vantagens da soldagem GMAW:

- A soldagem pode ser executada em todas as posições;
- Limpeza fácil pois não há necessidade de remoção de escória pesada;
- Maior taxa de deposição se comparado a processos como GTAW e SMAW;
- Pode ser realizada com altas velocidades de soldagem;
- Alimentação contínua do metal de adição;
- Penetração de raiz mais uniforme;
- Poucos problemas de distorção e tensão residual;
- Soldagem de fácil execução – menor exigência de habilidade manual do soldador.

Segundo Barbedo (2011) e Quites (2002, apud CAMPOS, 2005, p. 6) as desvantagens desse processo são:

- Maior velocidade de resfriamento aumentando, assim, a ocorrência de trincas;
- A solda deve ser protegida de correntes de ar, o que dificulta aplicações em campo;
- A soldagem não é fácil em locais de difícil acesso, pois o bocal da pistola precisa ficar próximo do metal base a ser soldado;
- Grande emissão de raios ultravioleta;

- Equipamento de soldagem mais caro e complexo, e menos portátil, do que o do processo SMAW.

Liskevych (2010) cita a regulagem mais complexa dos parâmetros, a maior sensibilidade às correntes de ar na soldagem em campo, a geração de respingos e acabamento do cordão prejudicado quando do uso de gases ativos, e o maior custo com consumíveis na soldagem de materiais mais nobres, como sendo as limitações do processo GMAW.

2.3 Processo GMAW STT[®]

Soldagem por transferência de tensão superficial, é um processo de soldagem GMAW cuja transferência metálica ocorre por curto-circuito controlado e que foi desenvolvido e patenteado pela empresa americana *The Lincoln Electric Company* (LINCOLN ELECTRIC COMPANY, 2017).

De acordo com (DERUNTZ, 2003), o STT[®] é uma nova abordagem concebida a partir da soldagem de arco curto que tem o objetivo de reduzir as características indesejáveis da transferência por curto-circuito convencional e assim evitar respingos e produzir soldas de qualidade superior por meio de um melhor controle da fonte de energia.

GMAW-STT[®] é um processo de soldagem moderno que representa uma inovação significativa nos processos de soldagem a arco, e sua excelente qualidade, a qual é similar à qualidade obtida no processo GTAW, aliado à sua maior eficiência e custo reduzido, o torna competitivo e tem elevado sua aplicação (ADI; ISMAR; PETAR, 2016).

O STT[®] é um processo indicado para soldas de baixo aporte térmico, que necessita baixa entrada de calor. O STT[®] também é ideal para aplicações em raiz aberta, tanto em placas quanto tubos; aço inoxidável e outras ligas de níquel; aço galvanizado e aplicações semiautomáticas e robóticas, desde a indústria petroquímica até a indústria automotiva e alimentícia (LINCOLN ELECTRIC COMPANY, 2017). Mvola *et al.* (2014) destaca a aplicação dos processos de GMAW avançados na soldagem de materiais dissimilares, que se mostram interessantes sobretudo devido ao controle da entrada de calor na solda.

O grande diferencial do processo STT[®] é a capacidade de controlar a corrente de modo independente da taxa de alimentação de eletrodo, o que torna possível aumentar a corrente sem a necessidade de adicionar mais arame. Não opera em corrente constante ou tensão constante, mas em alta frequência, onde a máquina controlada por corrente entrega energia ao arco de

acordo com as necessidades instantâneas do mesmo e não conforme uma tensão pré-ajustada (DERUNTZ, 2003). No processo STT[®], diferentemente do convencional, não existe controle de tensão e a corrente não está condicionada à velocidade de alimentação do arame, portanto o calor é ajustado diretamente pelos níveis de corrente, de forma independente da taxa de alimentação (*wire feed speed* – WFS) (LINCOLN ELECTRIC COMPANY, 2017).

O STT[®] utiliza uma avançada tecnologia eletrônica, a qual permite combinar as melhores características da soldagem de arco curto com o preciso controle de corrente do processo GTAW. A redução do nível de respingos é alcançada devido à tecnologia embarcada (*Waveform Control Technology*[™]) que, por meio de um inversor de alta velocidade, possibilita ajustes precisos na forma de onda da corrente de saída durante todo o ciclo de soldagem com o objetivo de realizar a transferência de uma única gota de metal líquido em cada curto (DERUNTZ, 2003) (ADI; ISMAR; PETAR, 2016).

No começo do curto-circuito o aumento da corrente é atrasado para permitir um assentamento adequado da gota na poça de fusão. Antes mesmo da ruptura do curto a corrente é reduzida para um nível baixo, dessa forma a força devido à tensão superficial continua a agir em favor da transferência da gota, porém não há influência das altas forças eletromagnéticas. Como resultado obtém-se uma transferência livre de respingos e estável, mesmo com gás de proteção CO₂. A principal limitação do sistema era a de depender de um valor de tensão pré-ajustado para detectar o momento de término do curto. Essa limitação foi vencida em sistemas comerciais por vários meios (NORRISH; CUIURI, 2014).

Mudanças na taxa de subida da tensão, que ocorrem devido ao aumento de resistência na região de estreitamento da ponte líquida durante o curto-circuito, foram utilizadas para detectar o ponto em que a corrente de curto-circuito deveria ser reduzida. Esta se tornou a base de um dos primeiros sistemas comerciais, o sistema *Lincoln STT*[®] ou “transferência de tensão superficial” (NORRISH; CUIURI, 2014).

A forma de onda correspondente a este sistema é mostrada na Figura 8.

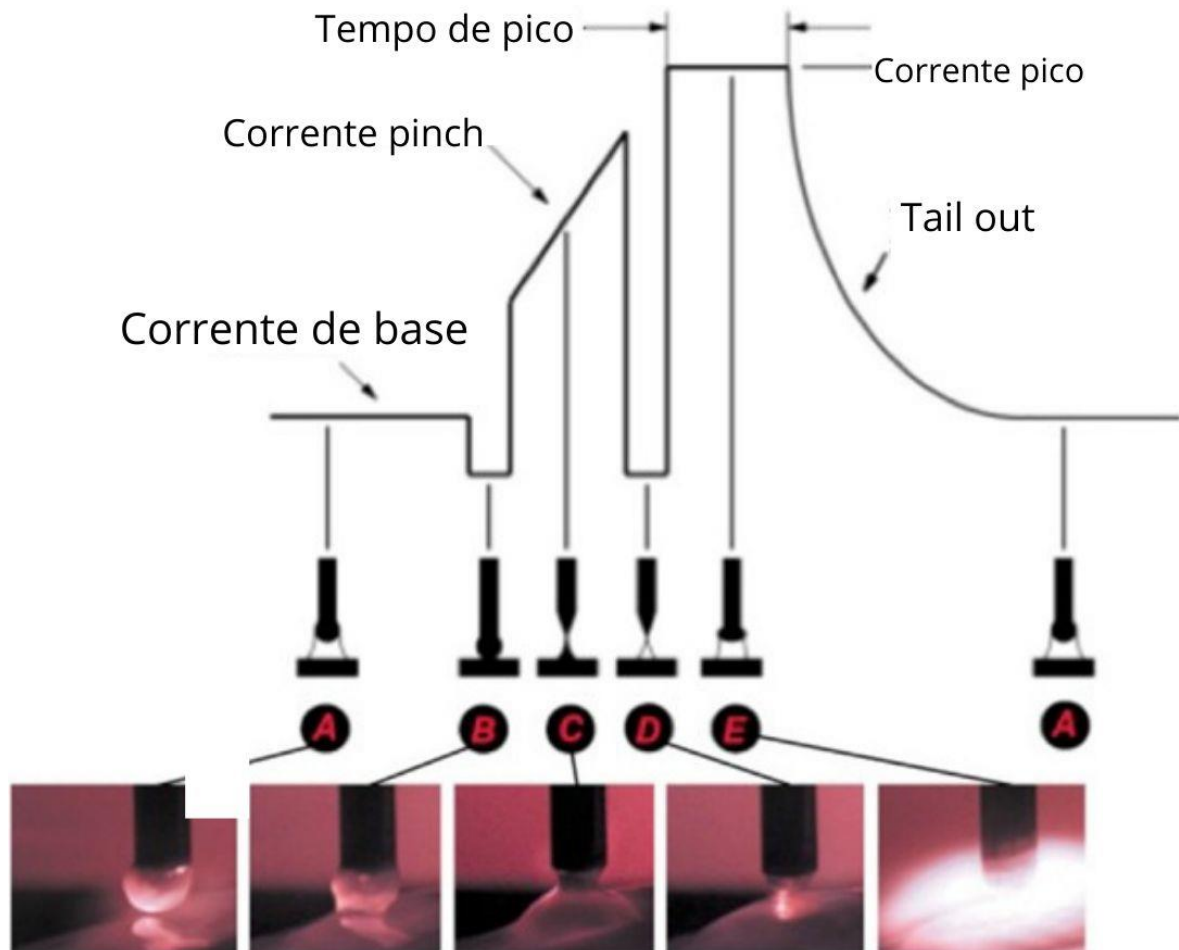


Figura 8- Forma de onda da corrente e sequência de transferência para o processo Lincoln STT® (Adaptado de NORRISH; CUIURI, 2014)

A corrente de base mantém o arco aberto e contribui para o aquecimento do metal base, sendo um bom controle do aporte de calor. Assim que se inicia o curto-circuito do eletrodo com a poça de fusão, a corrente é rapidamente reduzida para garantir um curto sólido. Na sequência a corrente de *Pinch* é aplicada para comprimir o metal líquido contra a poça de fusão enquanto são monitorados os sinais elétricos da ponte líquida. No momento em que essa ponte de metal líquido está prestes a romper, a fonte de energia do equipamento reduz a corrente para aproximadamente 45-50A. Após o restabelecimento do arco elétrico um pico de corrente (corrente de pico) é aplicado para produzir força de plasma suficiente para evitar curtos acidentais e aquecer a junta e a poça de fusão. Finalmente, por meio do parâmetro *Tail-Out* (To) regula-se a entrada geral de calor no processo (LINCOLN ELECTRIC COMPANY, 2017).

A Figura 9 demonstra de forma mais detalhada o comportamento do ciclo da tensão e da corrente durante o processo de soldagem STT®.

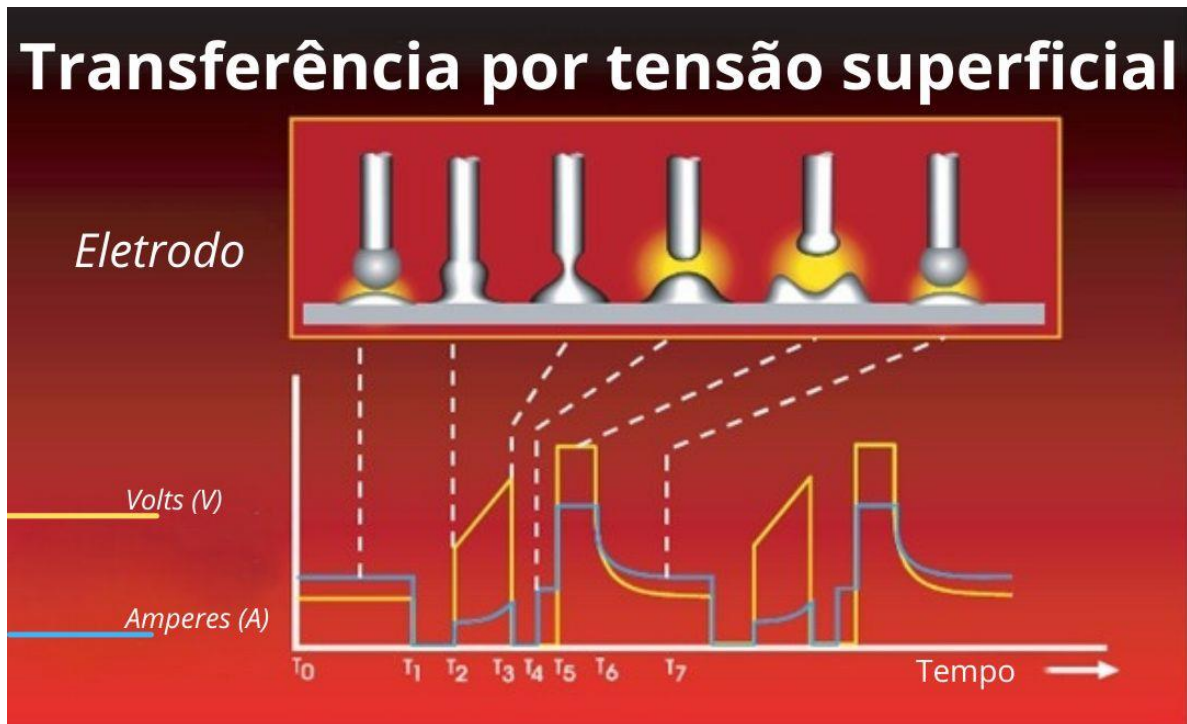


Figura 9- Ciclo da Corrente no Processo de Soldagem por Transferência de tensão superficial (Adaptado DeRuntz2003)

(STAVA, 2001, apud DERUNTZ, 2003, p. 3) divide em seis etapas o funcionamento do processo STT®:

- I. **Background current (T0 – T1):** É o nível da corrente do arco elétrico no exato momento antes do curto, dito nível de corrente em estado estacionário.
- II. **Ball time (T1 – T2):** Pouco antes de ocorrer o curto-circuito, ainda em corrente de base, a máquina detecta uma queda na tensão e retira amperagem do arco elétrico. A corrente de base é reduzida para 10 amperes durante um tempo de aproximadamente 0,75 milissegundos. No processo convencional, quando ocorre o curto-circuito, a corrente sobe de forma abrupta, motivo pelo qual há muita ocorrência de respingos.
- III. **Pinch mode (T2 – T3):** O arame continua sendo alimentado e há um curto entre o eletrodo e a peça de trabalho. Com o objetivo de destacar e transferir a gota de metal líquido a amperagem deve ser aumentada. Uma alta corrente então é aplicada, de maneira controlada, para agilizar a transferência da gota líquida do eletrodo para a poça de fusão. No tempo T3 começa a ocorrer o estrangulamento da gota, devido ao efeito *Pinch*. A voltagem nesse momento do ciclo é diferente de zero devido à alta resistividade do metal em seu ponto de fusão (1550 °C).

- IV. ***The dv/dt calculation*** (T2 – T3): Por meio do cálculo derivativo da taxa de variação da tensão no tempo identifica-se o completo destacamento da gota de metal líquido. Quando um valor específico de variação de tensão no tempo é atingido, indica que a separação está prestes a ocorrer e, portanto, a corrente é novamente reduzida por alguns microssegundos. Essa redução do nível de corrente tem como propósito evitar a separação violenta e explosão da gota, outro motivo que acarreta geração de respingos. Esse evento ocorre antes da separação da gota e no momento T4 a separação ocorre em baixo nível de corrente.
- V. ***Plasma boost*** (T5 – T6): A corrente aumenta nessa etapa para dar início à formação de uma nova gota. Uma alta corrente favorece a rápida fusão do eletrodo.
- VI. ***Plasma*** (T6 – T7): Esse é o período do ciclo em que a corrente é reduzida para seu nível estacionário. A corrente vai do seu nível mais alto para o nível inicial segundo uma curva “Tail-out”. O ciclo então se repete em um tempo necessário à formação de uma nova forma de onda, entre 25-35 milissegundos.

2.3.1 Comparação do Processo GMAW Tradicional com o Processo STT®

No processo GMAW convencional, em transferência por curto-circuito, um maior nível de respingos e gases são gerados como resultado da separação da gota líquida ocorrer em uma maior corrente de *Pinch* se comparado ao STT® (DERUNTZ, 2003). O nível relativamente mais alto de corrente no momento da separação da gota com a ponta do eletrodo acarreta maior geração de respingos.

A comparação do processo GMAW convencional e GMAW STT® é mais crítica especialmente na soldagem de tubos. O controle indireto da corrente no processo convencional, com o objetivo de manter a tensão constante, pode causar uma temperatura ou fluidez muito altas na poça de fusão, e como resultado ter o cordão encolhido na raiz da solda. Além disso, ao usar a soldagem de arco curto convencional GMAW, o operador deve ter um excelente controle do arco e a poça de fusão para garantir uma penetração satisfatória do cordão de solda (DERUNTZ, 2003). Costa (2011), observa em sua pesquisa que a utilização do processo STT® na soldagem de dutos de aço-carbono, diferentemente do que acontece para o convencional, permite um maior controle da penetração, minimiza o escorrimento do metal fundido e evita a ocorrência de defeitos.

O processo STT[®], em comparação ao processo GTAW, permite realizar uma solda de raiz aberta três ou quatro vezes mais rápido, com baixo aporte térmico e sem falta de fusão (STAVA, 2001, apud DERUNTZ, 2003, p. 4).

Segundo DeRuntz (2003), a tecnologia STT[®] minimiza a ZTA e a distorção devido à entrada de calor deste processo (7000 Joules por polegada) ser muito inferior aos processos convencionais (25000 a 30000 Joules por polegada). Para soldagem de tubos o processo facilita a realização de solda com abertura em passe de raiz, com melhor cordão inferior e fusão das bordas.

Comparado ao processo GMAW, a tecnologia STT[®] tem como vantagens eliminar falta de fusão, bom controle da poça, menor tempo de treinamento, soldas de qualidade, baixa geração de fumos e respingos, possibilidade de utilizar várias composições de gás de proteção e 100% CO₂ para soldagem de aço macio (LINCOLN ELECTRIC COMPANY, 2017).

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre os processos GMAW convencional e STT[®] feita por DeRuntz (2003).

Tabela 1: Quadro comparativo entre as características fundamentais do processo GMAW convencional e STT[®]

	GMAW	STT[®]
Processo de transferência do metal	Transferência Curto-circuito	Arco curto modificado com a escolha da corrente e tensão baseado na necessidade do arco
Faixa de Tensões	16V a 22V	16V a 22V
Faixa de Correntes	Baixas correntes: (30A a 200A)	Dois níveis de correntes: <ul style="list-style-type: none"> • Corrente de pico (0A a 450A) • Corrente de base (0A a 125A)
Tamanho do eletrodo	Diâmetros tipicamente menores (A partir de 0,60mm)	Diâmetros tipicamente maiores (A partir de 0,80mm)
Gás de proteção	<ul style="list-style-type: none"> • 100% CO₂ (baixo custo) • 75% Ar - 25% CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> • 100% CO₂ (baixo custo) • Mistura personalizada para atender a física do arco ideal
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Todas as posições de soldagem • Baixo custo 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo calor de entrada • Calor de entrada controlado • Todas as posições de soldagem • Fácil ajuste manual • Poucos respingos • Ampla gama de eletrodos • Baixa emissão de fumos • Gás de baixo custo • Boa fusão
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Respingos • Potencial de falta de fusão • Limitado a chapas finas 	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamento mais caro • Limitado ao modo curto circuito modificado

Custo da fonte	\$ 3,000	\$ 6,000
Treinamento/habilidade	Similar	Similar
Materiais	<ul style="list-style-type: none"> • Aço carbono e aços de baixa liga • Revestimento galvanizado/zincado • Aços inoxidáveis de ligas de Níquel • bronze ao Silício e ligas de cobre 	<ul style="list-style-type: none"> • Aço carbono e aços de baixa liga • Revestimento galvanizado/zincado (revestimento não afetado na parte traseira da chapa) • Aços inoxidáveis de ligas de Níquel (com grande redução de respingo) • bronze ao Silício e ligas de cobre
Indústrias	<ul style="list-style-type: none"> • Automotiva • Alimentícia e de processamento químico • Bens de consumo 	<ul style="list-style-type: none"> • Automotiva • Tubos e vasos de pressão • Geração de energia • Alimentícia e de processamento químico • Bens de consumo de alto padrão

2.3.2 Vantagens, Benefícios e Limitações.

O processo patenteado pela *Lincoln Electric* oferece muitas vantagens, principalmente sobre os meios de transferência de metal do arco curto, que refletem positivamente na melhor qualidade, custos operacionais reduzidos e melhores condições de operação. A espinha dorsal do STT® é a revolucionária tecnologia de forma de onda que permite controle preciso e independente da corrente durante todo o ciclo de soldagem. Esse controle digital preciso representa a próxima geração em tecnologia de soldagem e um novo futuro em aplicações industriais (SILVA, 2018).

2.3.2.1 Vantagens

O processo STT® permite realização de soldas com maior qualidade devido à característica de controle de corrente, durante todo o ciclo de soldagem, que elimina respingos, aumenta a taxa de deposição de arame consumível e concentra o arco elétrico no metal base, permitindo melhor fusão e auxílio na eliminação de junta fria (falta de fusão) em juntas de raiz aberta de tubos e vasos de pressão. Outra vantagem deste processo é o menor nível de distorção e falhas relacionadas a excesso de energia devido à menor entrada de calor (DERUNTZ, 2003).

O processo de soldagem STT® possui uma série de vantagens, tais como boa penetração e controle de baixa entrada de calor, o que o torna ideal para soldagem de juntas com raiz aberta e de pequena espessura; menor geração de fumos e gases; capacidade de usar gás de proteção

CO₂ ou misturas de argônio com arames de maior diâmetro, o que reduz custos; bom controle do cordão e maiores velocidades de deslocamento, o que o torna capaz de substituir o processo GTAW em muitas aplicações (LINCOLN ELECTRIC COMPANY, 2017).

Ainda de acordo com a fabricante *Lincoln Electric Company (2017)*, o processo STT[®] torna muito mais fácil as soldagens que requerem menor entrada de calor, como no caso de soldagem de chapas finas, além de minimizar as distorções. A geração de fumos e gases também é reduzida, mesmo utilizando arames de maior diâmetro e CO₂ como gás de proteção, o que reduz os custos com consumíveis.

O processo de soldagem GMAW-STT[®] apresenta muitas vantagens e melhorias se comparado aos processos GMAW convencional, SMAW e GTAW (ADI; ISMAR; PETAR, 2016) (ROSADO; ALMEIDA; PIRES, I. MIRANDA, R. & QUINTINO, 2008).

Controle da penetração e excelente controle de entrada de calor,

- Excelente na soldagem de passe de raiz aberta,
- Baixo nível de respingos e menor necessidade de limpeza da junta soldada,
- Maior velocidade de soldagem e maior produtividade (principalmente comparado ao processo GTAW),
- Tempo de soldagem reduzido,
- Menor entrada de calor (J/mm²) e menor deformação do metal de base,
- Controle satisfatório da poça de solda durante a soldagem,
- Fácil automatização,
- Permite uma maior abertura de raiz,
- Tempo de treinamento reduzido.

Adi; Ismar; Petar (2016) compararam o processo GMAW-STT[®] com os processos SMAW convencional e GTAW, a fim de determinar e confirmar suas vantagens, e verificaram que o processo da *Lincoln Electric* apresentou velocidade de soldagem até três vezes maior que os demais, conduziu a uma menor entrada de calor no material, alcançou maior taxa de deposição e produziu um cordão de solda de dimensões maiores que o processo GTAW, o que permite maior abertura e leve desalinhamento na soldagem de passe de raiz. Os autores também confirmaram uma redução significativa da quantidade de respingos e fumos, o que também refletiu num menor tempo de limpeza da solda.

2.3.2.2 Limitações

(DERUNTZ, 2003) cita algumas desvantagens do processo STT[®] em relação ao convencional, das quais destaca o maior custo da fonte de energia e a incapacidade de soldar alumínio.

Embora o STT[®] ofereça muitos benefícios, também é muito importante entender suas desvantagens em comparação ao processo convencional de curto-circuito. Silva (2018) apresenta as seguintes limitações:

- **Maior custo inicial:** A fonte de energia do STT[®] é inicialmente mais cara do que uma fonte convencional. Isso deve-se à tecnologia protegida por patentes e pela redução de custos propiciada.
- **Menores taxas de deposição:** As taxas de deposição são mais baixas se comparado às transferências globular, pulverização e pulsada, mas são iguais às da soldagem por curto-circuito.
- **Pode exigir treinamento adicional ao operador:** Como na soldagem por pulverização pulsada, a configuração dos parâmetros de soldagem para STT[®] é bastante diferente das configurações normalmente usadas e pode exigir treinamento adicional.
- **Incapacidade de soldar alumínio:** O processo STT[®] difere do processo convencional de curto-circuito pela sua incapacidade de realizar soldagem de alumínio.

2.4 Gás de proteção

O gás de proteção desempenha um importante papel na soldagem, tanto na proteção do metal fundido contra contaminação atmosférica, como também na forma e característica de estabilidade do arco elétrico, na geometria e na aparência do cordão, na microestrutura e nas propriedades metalúrgicas e mecânicas da solda, bem como nas características do processo, como por exemplo a velocidade de soldagem e a transferência metálica (MVOLA; KAH, 2017, KAH; MARTIKAINEN, 2013, ZIELINSKA *et al.*, 2008). Além disso, apresenta efeito notável no desempenho geral de processos de soldagem, sendo que a sua correta escolha, em uma determinada aplicação, está relacionada à qualidade, produtividade, eficiência, redução de custos de operação e melhoria das propriedades do cordão de solda (MVOLA; KAH, 2017) (ASM, 1993).

A principal função da atmosfera protetora é proteger a poça de fusão de reações indesejáveis com os gases presentes na atmosfera, tais como oxigênio e nitrogênio, os quais podem causar contaminação da solda. Outra importante característica é a promoção de um arco estável e uma transferência de metal mais uniforme (ASM, 1993).

Além de proteger a poça de fusão e auxiliar na abertura e manutenção do arco elétrico, os gases de proteção também têm função importante na transferência de massa. Ao ser submetido a uma diferença de potencial o gás absorve energia do arco e se ioniza gerando elétrons livres e átomos carregados positivamente. Por meio do movimento de íons e elétrons é que ocorre a geração de calor e transferência de massa para a poça de fusão (MOREIRA, 2008).

Nos processos de soldagem a arco elétrico a transferência de metal acontece por intermédio de um meio condutor, que é formado pelo gás ionizado, metais fundidos, vapores e moléculas, e recebe o nome de plasma. A formação e estrutura do plasma depende das propriedades do gás de proteção (ASM, 1993). O gás de proteção influencia na propriedade do plasma e na entrada de calor na peça, e como consequência o resultado da solda difere de acordo com a atmosfera protetora que se utiliza (WILHELM *et al.*, 2010). Conforme Wang *et al* (2014), a composição do gás de proteção afeta muito o perfil de temperatura do arco plasma, a transferência de calor para a peça e a dimensão do cordão de solda. É necessário entender o papel do gás de proteção nas características do plasma para que se possa obter soldas de qualidade satisfatória (CAI *et al.*, 2017b).

Na soldagem GMAW o tipo de gás utilizado exerce uma grande influência no modo de transferência do metal, nas características do arco, na velocidade de soldagem, nas perdas por projeções (respingos), na penetração e na forma externa da solda (ASM, 1993, QUITES, 2002, apud BARBEDO, 2011, p. 12, QUITES, 2002, apud CAMPOS, 2005, p. 4). Conforme Mvola; Kah; Layus (2018), Kou (2003) e Kim; Frost; Olson (1998), os gases de proteção exercem influência sobre a estabilidade do arco, o tipo de transferência, a geometria do cordão, as propriedades mecânicas, formação de porosidade, bem como a facilidade de soldagem em diversas posições, o rendimento e os custos do processo.

O gás de proteção interage com metal de base e metal de adição para produzir resultados esperados de propriedades mecânicas da solda, tais como tenacidade, dureza, resistência a corrosão. Além disso afeta a forma do cordão e o seu perfil de penetração (ASM, 1993). O fluxo de gás deve ser ajustado conforme o arco para evitar turbulência e permitir uma adequada proteção (MVOLA; KAH; LAYUS, 2018). A vazão adequada para as condições de soldagem de modo geral é de 10 a 16L/min, sendo que vazões maiores são normalmente ineficientes (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

2.4.1 Propriedades dos gases

Moreira (2008) cita as três principais propriedades de um gás de proteção:

1. Potencial de Ionização – Energia necessária para ionizar os átomos do gás. Está relacionada à facilidade de ignição e estabilidade do arco elétrico.
2. Condutividade térmica – Está relacionada à capacidade de transferência de calor. Gases que possuem maior condutividade térmica transferem mais calor para o metal de base.
3. Potencial de oxidação – Essa propriedade está relacionada à capacidade de promover oxidação

De acordo com Moreira (2008), as características principais do argônio e do dióxido de carbono (CO₂) são:

ARGÔNIO

- Inerte;
- Penetração reduzida;
- Menor custo;
- Maior disponibilidade;
- Baixo potencial de ionização (em torno de 15,7 V);
- Baixa condutividade térmica;
- Ideal para soldagem de chapas finas;
- Facilita a abertura do arco;
- Arco estável;
- Baixa quantidade de respingos

DIÓXIDO DE CARBONO

- Boa velocidade de soldagem;
- Alta energia de ionização;
- Alta condutividade térmica;
- Ideal para soldagem de chapas grossas;
- Excelente penetração;
- Grande quantidade de respingos;
- Arco instável.

A Tabela 2, adaptada de Mvola; Kah (2017), apresenta as propriedades físicas e químicas do Argônio e do Dióxido de Carbono. As mesmas propriedades são apresentadas também por (KAH; MARTIKAINEN, 2013) (RAO; LIAO; TSAI, 2010).

Tabela 2: Propriedades Físicas e Químicas dos gases Ar e CO₂

Gás de Proteção	Densidade a 15°C, 1 bar (kg/m³)	Energia de Dissociação (eV)	Potencial de Ionização (eV)	Atividade Química
Argônio (Ar)	1,67	0	15,8	Inerte
Dióxido de Carbono (CO ₂)	1,85	4,3	14,4	Oxidante

Segundo Wong; Ling (2014), ao utilizar Argônio como gás de proteção, devido ao seu maior potencial de ionização e condutividade elétrica, em comparação ao CO₂, facilita-se a abertura e melhora a estabilidade do arco elétrico. Já o CO₂, conforme os autores, possui maior condutividade térmica, o que conduz a uma maior distribuição de temperatura no arco e maior penetração do cordão de solda. Sarma (2014) explica que para o Argônio, que é um gás monoatômico, a ionização ocorre diretamente e mais fácil é a ignição do arco. Já no caso de o gás ser diatômico ou poliatômico, como o CO₂, antes mesmo de ser ionizado, é necessário que haja a dissociação dos átomos, o que requer uma energia adicional. No entanto, essa energia consumida pelo processo de dissociação é novamente liberada na forma de energia de recombinação, o que pode aumentar a entrada de calor e a velocidade de soldagem. Rao; Liao; Tsai (2010) também atribuem a facilidade de abertura do arco com o gás de proteção Ar ao seu menor potencial de ionização.

Devido à dissociação que ocorre no CO₂, o volume e a pressão de gás aumentam no arco elétrico (KAH; MARTIKAINEN, 2013).

A condutividade térmica do gás de proteção, à temperatura do arco (plasma) influencia o valor da tensão, bem como a energia térmica transferida à poça. Quanto maior a condutividade térmica da proteção gasosa, maior a tensão necessária para sustentar o arco e maior a energia térmica entregue à poça de fusão. Sendo assim, como a condutividade térmica do dióxido de carbono é maior que a do argônio, ele necessita de maior tensão para manter o arco estável e transfere mais energia para a solda (FORTES; VAZ, 2005) (LISKEVYCH, 2010). Wang *et al* (2014) verificaram que o calor específico e a condutividade térmica do gás de proteção

aumentam com o aumento do conteúdo de CO₂ no argônio. Segundo Kah; Martikainen, (2013), enquanto o dióxido de carbono apresenta boa condutividade térmica, a do argônio é baixa.

Segundo Quites (2002, apud CAMPOS, 2005, p. 5), um gás de maior condutividade térmica afeta a coluna de plasma, concentrando-a e aumentando a densidade de corrente e a temperatura do arco, o que por sua vez aumenta a penetração do cordão, conforme ilustrado pela Figura 10.

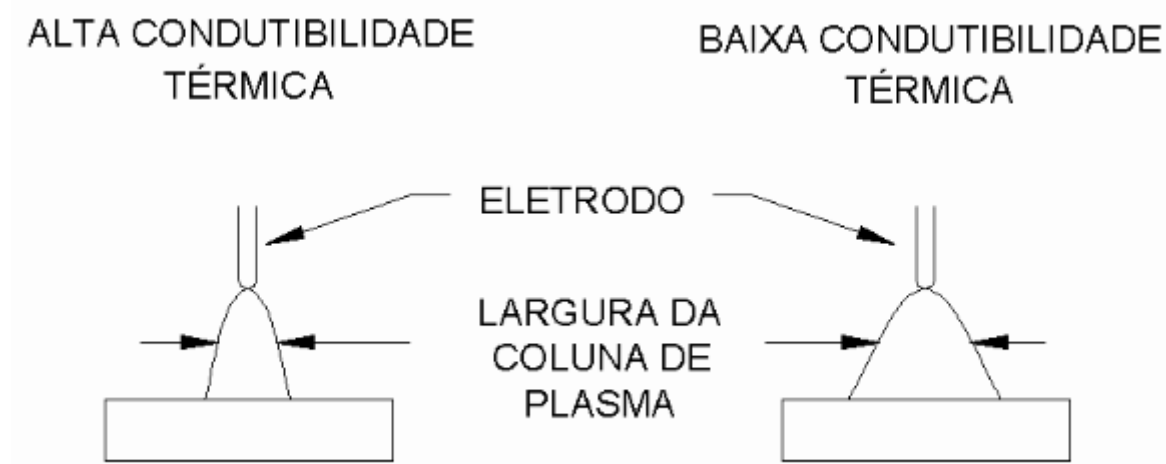


Figura 10- Efeito da condutividade térmica do gás na coluna de plasma

Os processos de difusão de carbono e de oxidação se desenvolvem à medida que os elementos químicos presentes no metal de solda reagem com o oxigênio monoatômico, formando óxidos, ou com o próprio carbono, promovendo sua entrada ou saída do metal de solda, o que dependerá de sua concentração (MOREIRA, 2008). Segundo Machado (1996), atmosferas protetoras ricas em CO₂ apresentam uma tendência de transferência ou retirada de carbono da poça de fusão, o que dependerá do teor de carbono presente no metal de solda.

A Tabela 3, adaptada de Katherasan; Sathiya; Raja (2013), apresenta o potencial de oxigênio dos gases Ar e CO₂, bem como algumas misturas.

Tabela 3: Potencial de Oxigênio (O_p) para diversas misturas Ar+CO₂

Gás de Proteção	100% Ar	95% Ar + 5% CO ₂	90% Ar + 10% CO ₂	80% Ar + 20% CO ₂	100% CO ₂
Oxigênio Potencial (O_p)	0	3,5	7	14	70

De acordo com Liskevych (2010) devido o CO₂ possuir maior densidade e potencial de oxidação em comparação ao Argônio, o que torna sua presença na mistura favorável em relação

à ação protetora do gás, mais resistente a correntes de ar, e à estabilidade do arco. O efeito oxidante, por sua vez, pode ser facilmente neutralizado pela adição de elementos desoxidantes no arame eletrodo.

Conforme CAI *et al.*, (2017a), o argônio é o gás mais utilizado no processo GMAW, entretanto, apresenta uma desvantagem devido ao fluxo de calor do arco para a peça de trabalho ser relativamente pequeno, o que limita, segundo os autores, a profundidade da poça de fusão.

2.4.2 Gases utilizados na soldagem GMAW

Na soldagem GMAW de aços ao carbono o CO₂ é a mistura mais indicada por ser um gás de baixo custo e que propicia maior penetração e maiores velocidades de soldagem. Por outro lado, o uso de CO₂ puro está associado com a geração de respingos e perda de elementos por oxidação (LISKEVYCH, 2010) (KAH; MARTIKAINEN, 2013). Já o argônio puro não é adequado à soldagem do aço pois não produz estabilidade do arco e características desejáveis ao cordão de solda, sendo a mistura deste com um gás oxidante, como o dióxido de carbono, mais interessante (EBRAHIMNIA *et al.*, 2009). O Argônio, por ser um gás inerte, é utilizado na soldagem GMAW de ligas de alumínio (WANG *et al.*, 2014). De modo geral, CO₂ ou misturas ricas em argônio, com CO₂ ou O₂, são os gases utilizados no processo GMAW (WILHELM *et al.*, 2010, LISKEVYCH; SCOTTI, 2014). Na soldagem de aços em juntas estreitas, por exemplo, utiliza-se como gás de proteção a mistura Ar e CO₂ (CAI *et al.*, 2017b).

De acordo com Moreira (2008), gases inertes, como argônio e hélio, tem uma predileção de uso por questões metalúrgicas, enquanto o CO₂ puro é mais visado por questão econômica, devido ao seu menor preço, entretanto este último apresenta problemas com respingo, perda de elementos de liga por oxidação e baixa performance nas soldagens fora de posição. O autor também cita o argônio puro como indesejável na soldagem de aços dada à dificuldade de obter características geométricas ideais do cordão, e acrescenta que a adição de elementos oxidantes ao argônio confere ao arco maior estabilidade e energia, tornando essa mistura mais interessante à soldagem de aços.

Com o intuito de atender os requisitos de soldagem, geralmente utiliza-se uma mistura de dois, três ou quatro gases distintos, onde cada um confere características para a mistura. Para a seleção dos componentes dessa mistura vários fatores podem ser levados em conta, incluindo o material que se deseja soldar e as reações químicas e metalúrgicas esperadas entre os gases e a poça de fusão (KAH; MARTIKAINEN, 2013). A adição de oxigênio reduz a força de tensão superficial e permite uma ionização mais fácil da mistura gasosa, enquanto a adição de dióxido

de carbono aumenta a rigidez do arco e a penetração da solda e tem um efeito de limpeza (SUBAN; TUŠEK, 2001).

Misturas gasosas são de uso comum na soldagem por correlacionar propriedades desejáveis dos gases puros. Como exemplo tem-se a adição de argônio ao dióxido de carbono, que reduz os níveis de respingos. O gás de proteção C25 (Ar+25%CO₂) é muito utilizado na soldagem com transferência por curto-circuito (FORTES; VAZ, 2005) (LISKEVYCH, 2010). Para aplicações de altas correntes em materiais espessos pode alcançar boa estabilidade do arco, controle da poça de fusão e aparência do cordão, assim como alta produtividade (FORTES; VAZ, 2005).

Misturas Ar-CO₂ são amplamente utilizadas na soldagem de aços, tanto devido ao baixo custo do CO₂ em comparação ao oxigênio, como também às vantagens de seu uso, que proporciona uma melhoria na forma do cordão resultante da soldagem com Ar puro e gera menos respingos que a soldagem com CO₂ puro (LU; FUJII; NOGI, 2004, 2010). Porém, segundo Liskevych (2010), a quantidade de CO₂ na mistura ainda é discutível e seu efeito na solda precisa ser mais bem entendido para garantir um bom desempenho do processo de soldagem.

2.4.3 Efeitos do CO₂ no gás de proteção

2.4.3.1 Efeito no arco elétrico e estabilidade

Cai *et al* (2017b) estudaram a influência de uma mistura ternária na soldagem GMAW de aço-carbono e, mediante os resultados obtidos, concluíram que o comprimento do arco decresce de modo significativo com o aumento de CO₂ na mistura de gás. Ainda de acordo com os autores, quando a mistura gasosa muda, o comportamento do arco se modifica no sentido de manter a taxa de fusão igual à sua velocidade de alimentação. A Figura 11 apresenta o comportamento do arco elétrico para teores de CO₂ de que variam de 5% a 25%. É possível identificar como o comprimento diminui à medida que o teor de dióxido de carbono no gás aumenta.

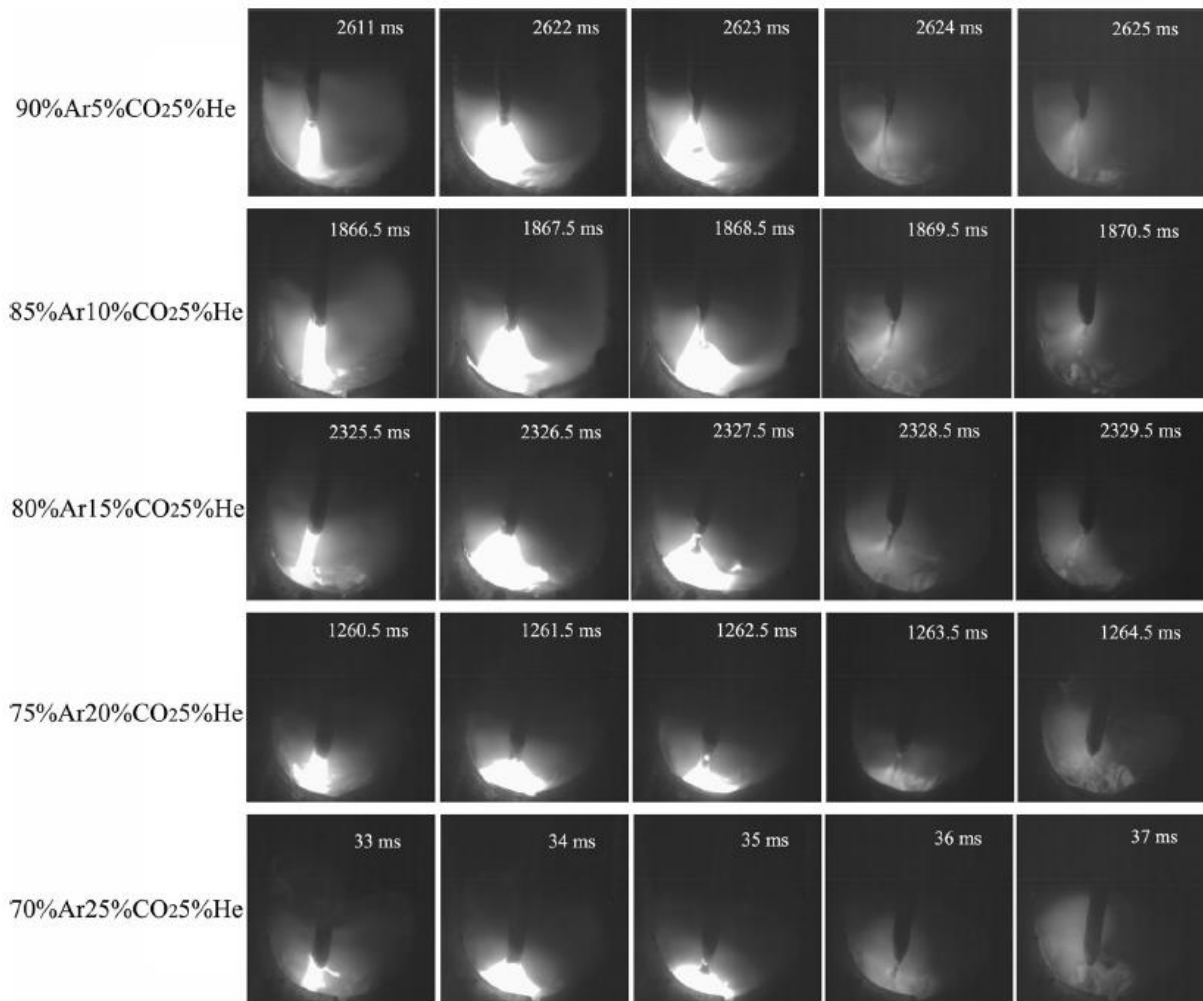


Figura 11- Comportamento do arco para diferentes teores de CO₂ no gás de proteção (CAI et al 2017a)

Groetelaars & Scotti (2007) ao pesquisarem a influência do gás de proteção na soldagem GMAW duplo arame de aço-carbono, constataram que o aumento do teor de CO₂ reduz o comprimento do arco, gera mais respingos e, assim, causa uma diminuição dos valores da taxa de deposição. Esse resultado está em acordo com os descritos por Liskevych (2010) em sua investigação sobre os efeitos que o aumento da porcentagem de dióxido de carbono exerce na estabilidade do processo GMAW por curto-circuito. Em sua pesquisa a autora observa que o aumento do teor de CO₂ reduz a regularidade da transferência de metal, propiciando a ocorrência de eventos que aumentam a geração de respingos e assim prejudicam a aparência do cordão.

Wang *et al* (2014) estudaram os efeitos da composição do gás na distribuição de temperatura do arco e no comportamento da poça de fusão durante a soldagem GMAW de aços utilizando argônio puro, CO₂ e diferentes misturas binárias de Ar-CO₂, e os resultados mostraram que conforme aumenta-se a quantidade de CO₂ na proteção, um arco de plasma

constrito e de maior densidade de energia é gerado. A constrição do arco deve-se ao aumento da força eletromagnética, também conhecida como força de Lorentz, que ocorre pelo aumento do calor específico devido ao efeito *Pinch* térmico (TANAKA *et al.*, 2008). Já o aumento de energia está relacionado à maior condutividade térmica do gás, que conduz ao aumento da densidade de corrente no centro do arco e seu consequente aquecimento ôhmico. Esses efeitos, ainda conforme os autores, resultam em uma maior transferência de calor para a peça de trabalho e consequentemente uma poça de fusão maior e mais profunda e um perfil da solda com menor altura do reforço, maior largura e penetração. Conforme Norrish & Cuiuri (2014), à medida que diminui a quantidade de CO₂ no gás de proteção, o efeito de aquecimento da peça também é reduzido.

Cai *et al* (2017b), Wang *et al* (2014), Wilhelm *et al* (2010), Liskevych (2010) e Pires; Quintino; Miranda (2007) observaram que com o aumento da concentração de CO₂ no gás de proteção, maior a diferença de potencial no arco elétrico (tensão) para um mesmo valor de corrente. Wang *et al* (2014) atribuem isso ao aumento da resistência elétrica do gás devido à sua maior condutividade térmica, que ocasiona maior perda de energia por condução se comparado ao argônio puro, e devido à alta energia necessária para dissociação das moléculas de CO₂, o que resulta na redução da área do arco e demanda de uma maior tensão elétrica para manter sua estabilidade. Segundo Pires; Quintino; Miranda (2007) e Liskevych (2010), isso está relacionado à alta condutividade térmica do CO₂, que gera mais perda de calor por indução e desta forma necessita de tensões mais altas para manter a estabilidade do arco.

A adição controlada de O₂, CO₂ ou mistura desses gases, é geralmente utilizada para obter um arco mais estável, reduzir o coeficiente de tensão superficial do metal líquido e auxiliar na formação de melhores soldas (WANG *et al.*, 2014, ZIELINSKA *et al.*, 2008, PIRES; QUINTINO; MIRANDA, 2007, MUKHOPADHYAY; PAL, 2006). Isso ocorre porque a camada de óxido, gerada pela reação do gás ativo com o metal líquido, diminui a função trabalho do elétron do cátodo (reduz a energia necessária para emissão de elétrons), confere estabilidade ao arco, diminui a tensão superficial da poça líquida e aumenta a fluidez do metal líquido, o que ajuda na formação da poça de fusão e melhora a forma final do cordão (WANG *et al.*, 2014). Entretanto, de acordo com Kah *et al.*, (2014), a estabilidade do arco é menor em mistura de gases com maior conteúdo de dióxido de carbono.

2.4.3.2 *Efeito nas características geométricas e formato do cordão*

Segundo Modenesi & Nixon (1994) o gás de proteção tem uma influência significativa sobre a geometria do cordão de solda, e a redução da tensão superficial da poça de fusão, obtida pela presença de um elemento oxidante na mistura, suaviza o perfil do cordão, reduz convexidade e reforço, e aumenta a penetração.

Suban & Tušek (2001), Ebrahimnia *et al* (2009) e Liskevych (2010) também verificaram em suas pesquisas que o maior percentual de CO₂ no gás de proteção resulta em um aumento da penetração e área fundida do cordão de solda, e atribuíram isso ao aumento do tamanho das gotas e ao maior potencial de dissociação e ionização do dióxido de carbono, que produz uma maior entrada de energia na poça de fusão, tornando-a maior e mais profunda.

O aumento de gás carbônico na mistura gasosa aumenta a entrada de calor e confere uma maior penetração à solda (LISKEVYCH; SCOTTI, 2014). A quantidade de CO₂ na mistura depende do material que se deseja soldar e do tipo de transferência utilizada. No modo de transferência por curto-circuito é muito comum utilizar uma mistura que contenha de 20-30% de CO₂ (WANG *et al.*, 2014). Na soldagem de aço-carbono utilizando proteção de argônio e dióxido de carbono, uma mistura de 5-20% de CO₂ produz alta velocidade de soldagem, maior penetração e menor quantidade de poros (KAH; MARTIKAINEN, 2013).

Em seus estudos Moreira (2008) relata que a corrente de soldagem não apresentou uma influência significativa sobre os valores dos parâmetros geométricos em questão. No entanto, o percentual de CO₂ no gás de proteção já demonstra ser um fator que exerce uma maior influência sobre os valores dos parâmetros geométricos. Aumentos nos percentuais de CO₂ até 15% geraram diminuições na altura e aumentos na penetração. A partir desse percentual, os valores de altura e penetração apresentaram pequenas oscilações em seus valores.

Groetelaars & Scotti (2007) ao estudarem o efeito do percentual de CO₂ em Argônio para a soldagem GMAW duplo-aramé de aço ao Carbono (ABNT 1020), também constataram que aumentos no percentual de CO₂ promovem uma elevação dos valores de taxa de diluição. Para Moreira (2008) à medida que o percentual de CO₂ no gás de proteção aumentou a taxa de diluição cresceu. A corrente de soldagem não apresentou significativa relação com a taxa de diluição, tal comportamento pode ser atribuído ao fato de as variações de corrente durante a realização da solda não serem suficientes para proporcionar alterações significativas nos valores de taxa de diluição, ficando a cargo do tipo gás de proteção as variações mais sensíveis sobre essa resposta. Todavia, em ambos os casos discutidos anteriormente, não se pode afirmar que a corrente de soldagem não afete a taxa de diluição.

Gases de proteção a base de CO₂ geram cordões com maior pressão de arco, poucos desvios das gotas para as paredes do chanfro e melhor molhabilidade. O mesmo acontece para

arcos elétricos mais curtos (menores tensões médias), em que ocorre um adequado direcionamento das gotas para o metal de solda e isso resulta em uma molhabilidade melhorada (PEREIRA, 2002, apud MOREIRA, 2008, p. 38). Segundo Baixo; Dutra (2009), quando há oxigênio presente na mistura, seja na forma pura (O_2) ou combinada (CO_2), a tensão superficial do metal fundido pode ser reduzida e assim conferir uma maior molhabilidade à solda.

Na soldagem de aços pelo processo GMAW, o uso de argônio puro ou uma mistura gasosa com uma alta porcentagem de argônio resultou em uma penetração indesejada do tipo *finger*, devido à baixa condutividade do argônio e devido à camada de oxidação presente na superfície dos aços não ser muito densa, o que tende a gerar uma instabilidade para os pontos do cátodo para o argônio e resulta em formas e penetração irregulares na solda. O aumento da adição de CO_2 na mistura contribui para diminuir aparência de *finger* da penetração do cordão (WANG *et al.*, 2014). De acordo com Mvola; Kah; Layus (2018) uma penetração rasa e com formato afunilado no meio (*finger*) é típico do GMAW quando se utiliza gás de proteção Argônio. Essa informação também é citada por Chandrasekaran *et al.*, (2019), que atribuem a penetração dediforme à menor condutividade térmica do gás Ar, que cria um arco mais estreito e transfere menos energia para a peça, e à maior agitação da poça de fusão.

2.4.3.3 *Efeito nas propriedades mecânicas e microestrutura*

Com relação aos resultados mecânicos do metal de solda, Moreira (2008) cita que os níveis de dureza decresceram desde o metal de solda até o metal de base. O autor avaliou gases de proteção de 2% a 100% de CO_2 , e explica que maiores valores de dureza na região do metal de solda devem-se ao elevado teor de Manganês, presente no metal de adição, associado ao metal de base rico em Carbono, o que eleva a temperabilidade dessa região.

Ebrahimnia *et al* (2009) avaliaram quatro misturas de gás de proteção, de 2,5% a 25% de CO_2 , e concluíram que o aumento de CO_2 na mistura gera uma diminuição de dureza no metal de solda. Já Suban & Tušek (2001), que avaliaram uma mistura de 18% de CO_2 e o gás CO_2 puro, relatam que a adição de gás carbônico aumenta a dureza do cordão.

Uygur & Gulenc (2004), trabalhando com CO_2 puro e 5% a 30% de CO_2 na mistura com argônio, e Canto (1990), que avaliou, além do CO_2 puro, misturas de 8% a 40% de CO_2 , também estudaram o efeito que a composição do gás de proteção exerce sobre propriedades mecânicas do metal de solda de aço baixo carbono. Seus resultados demonstram que o aumento do percentual de CO_2 na mistura provocou diminuição no alongamento (ductilidade) e na tenacidade ao impacto, para toda a faixa de temperatura ensaiada (-60 a 20°C). Os primeiros

autores também concluíram que aumentos nos valores das tensões limite de escoamento, limite de resistência, limite de fadiga e número de ciclos para a falha, estão associados a uma maior quantidade de dióxido de carbono na atmosfera protetora. Segundo Moreira (2008), o aumento de oxigênio e hidrogênio na solda aumenta sua resistência, mas, em contrapartida, diminui sua tenacidade, enquanto baixos percentuais de CO₂ e O₂ no gás de proteção geram poucas inclusões de óxidos, o que torna a microestrutura mais refinada, beneficiando a resistência ao impacto.

2.4.4 Porosidade e inclusão

Moreira (2008) estudou o efeito de misturas binárias Ar-CO₂ na soldagem GMAW do aço ASTM A-36 com arame sólido AWS E70S-6 e concluiu que a composição do gás influencia diretamente nas características geométricas do cordão de solda, assim como na formação de porosidades e inclusões. O autor afirma que aumentos no percentual de CO₂ no gás de proteção promovem o crescimento na quantidade de porosidades/inclusões por unidade de volume.

A porosidade é um defeito de soldagem que está associado ao gás de proteção. A presença de poros em uma solda favorece início de propagação de trincas e diminui a vida em fadiga do material (KAH; MARTIKAINEN, 2013).

Em misturas que utilizam proporções de CO₂ os elementos químicos presentes no gás de proteção tenderão a migrar para o interior do metal de solda, causando alterações no teor de Carbono e na quantidade de porosidades e inclusões de óxidos, tal como afirma (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Segundo Moreira (2008), as inclusões e porosidades podem comprometer a resistência mecânica de juntas soldadas e reduzir sua resistência à fadiga, sendo necessário o emprego de alguma medida para aumentar a resistência da junta; realizar um alívio de tensões, minimizar os defeitos oriundos do processo de soldagem ou melhorar o acabamento superficial da solda.

A adição de O₂ ou CO₂ no gás de proteção a base de Argônio causa oxidação, levando a perda de alguns elementos de liga e gerando inclusões. Em geral, a presença de inclusões é maléfica às propriedades do cordão (LESNEWICH, 1990, apud MOREIRA, 2008, p. 39). No entanto, certas inclusões de óxidos promovem a formação de Ferrita Acicular (*"Acicular Ferrite"* - AF), a qual contribui para aumentar a tenacidade do metal de solda (CANTO, 1990). Já no trabalho feito por Ebrahimnia *et al* (2009) o aumento de gás carbônico na mistura levou a uma diminuição da quantidade de poros e inclusões, diminuição da fase ferrita acicular e um leve aumento na tenacidade, o qual foi atribuído à menor formação de óxidos.

Misturas com alto nível de oxigênio potencial têm sua tenacidade ao impacto prejudicada pela formação de inclusões no metal de solda, as quais atuam como pontos concentradores de tensão e de propagação de trincas (MOREIRA, 2008). Isto está de acordo com o exposto por Kah; Martikainen (2013), que relatam que o aumento do potencial de oxidação do gás de proteção, na soldagem de aço-carbono, leva a uma diminuição não somente da tenacidade como também da resistência à tração do material depositado.

É válido lembrar que o oxigênio potencial dissolvido na poça de fusão não causa somente inclusões de óxidos. Se na poça de fusão existir uma quantidade suficiente de oxigênio dissolvido, este reage com o carbono presente no aço produzindo CO ou CO₂, os quais causam porosidades quando o metal de solda se solidifica (MOREIRA, 2008). A presença de porosidades também é responsável pela queda no nível das propriedades mecânicas do cordão (KOU, 2003).

2.5 Planejamento de Experimentos

O planejamento de experimentos é definido como “uma abordagem sistemática e rigorosa para a resolução de problemas de engenharia, que aplica princípios e técnicas na fase de coletas de dados de modo a assegurar a geração de conclusões de engenharia válida, defensável e suportáveis” (NIST/SEMATECH, 2001).

Dentre as técnicas de análise de experimentos, destaca-se o DOE. É um método que economiza recursos ao identificar as variáveis que mais influem no processo realizando um número mínimo de experimentos. Desta forma, obtém-se maior desempenho do processo, minimizando a variabilidade e os custos envolvidos (FONSECA, 2015).

O planejamento experimental, baseado nos fundamentos estatísticos é uma poderosa ferramenta para se chegar às condições otimizadas de um processo. A determinação da influência de uma ou mais variáveis sobre outras de interesse, pode ser um grande problema para os experimentadores. Assim, a condução adequada dos experimentos, de acordo com o planejamento elaborado, garante o sucesso do problema em estudo. Durante a sua realização, deve-se estar atento para detectar as anormalidades ocorridas, além de documentá-las para posterior análise, quando, então, serão estimados os fatores incluídos no modelo utilizando métodos estatísticos adequados, culminando na inferência, interpretação, discussão dos resultados, além da recomendação de melhorias, quando necessário (FONSECA, 2015).

O DOE pode ser definido como um processo de planejamento dos experimentos para que os dados apropriados possam ser coletados e depois analisados por métodos estatísticos, resultando em conclusões válidas e objetivas. Desta forma, qualquer problema experimental tem dois aspectos: o projeto dos experimentos e a análise estatística dos seus dados (MONTGOMERY, 2012).

Uma vez selecionados os fatores e seus respectivos níveis, gera-se uma combinação desses fatores sob a forma de arranjos experimentais. Para a área industrial, normalmente procura-se extrair o máximo de informações sobre a influência dos fatores de entrada, pois estas são as variáveis que controlam o processo, sobre as respostas (fatores de saída) ou variáveis de interesse. Esse procedimento é feito com o menor número possível de observações, visando à diminuição de custo e a maximização da rapidez (FONSECA, 2015).

Um arranjo muito utilizado é o fatorial completo de dois níveis, em que o número de experimentos é igual ao número de níveis experimentais, neste caso 2, elevado ao número de fatores (k). Esse tipo de arranjo cobre todo o espaço experimental, porém conforme aumenta o número de variáveis, o número de corridas cresce de forma exponencial, de modo que muitos fatores podem demandar muito tempo e recurso e assim tornar a experimentação inviável. Neste caso, se houver pouco interesse nas interações, pode-se negligenciá-las, gerando-se frações do experimento completo (experimento fracionado) sem comprometer a detecção dos efeitos principais (MONTGOMERY; RUNGER, 2003) (MONTGOMERY, 2012). Para Fonseca (2015) um fatorial fracionado deve ser escolhido com o objetivo de determinar os parâmetros mais influentes no processo, e em seguida em cima dos resultados obtidos, um arranjo fatorial completo é gerado com o intuito de determinar se existe curvatura para as respostas escolhidas.

A metodologia de superfície de resposta (MSR) é um agrupamento de ferramentas matemáticas e estatísticas para avaliar a influência entre as respostas e os parâmetros, com objetivo de otimizar essas respostas. A maior parte dos problemas que envolvem MSR não se conhece a relação entre os fatores de entrada e saída, portanto, essa relação geralmente é aproximada utilizando polinômios de primeira ordem, ou um polinômio de segunda ordem caso o processo esteja próximo ao ponto de ótimo (MONTGOMERY, 2012).

A equação abaixo (1) apresenta um polinômio de primeira ordem.

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (1)$$

Onde:

y – Resposta de interesse

Xi – Parâmetros independentes (entradas)

β_i – Coeficientes a serem estimados

k – Número de parâmetros independentes

ε – Erro experimental

Já um polinômio de segunda ordem tem a forma apresentada na equação abaixo (2).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k (\beta_i X_i) + \sum_{i=1}^k (\beta_{ii} X_i^2) + \sum_{i < j} (\beta_{ij} X_i X_j) + \varepsilon \quad (2)$$

De acordo com Fonseca (2015), a MSR caracteriza-se como uma das principais técnicas de Projeto e Análise de Experimentos, que tem sido utilizada com frequência por vários pesquisadores e contribuído para otimização e melhor entendimento dos fenômenos envolvidos nos mais diversos processos de fabricação.

Pesquisadores realizam experimentos em praticamente todos os campos de investigação, geralmente, visando descobrir algo sobre um determinado processo ou sistema. Um experimento planejado pode ser definido como um teste, ou uma série de testes, em que mudanças propositalmente são feitas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema com o objetivo de observar e identificar mudanças correspondentes na resposta de saída. Desta forma, a experimentação pode ser caracterizada como parte fundamental para o método científico na análise das diversas aplicações de engenharia, e que permite que engenheiros e cientistas melhorem o desempenho de um processo de fabricação (MONTGOMERY, 2012).

Geralmente, os experimentos são usados para estudar o desempenho de processos e sistemas. O processo, conforme indicado na Figura 12, pode ser uma combinação de operações, máquinas, métodos, pessoas e outros recursos que transforma um material de entrada em um produto de saída, que pode possuir uma ou mais respostas. Algumas variáveis do processo são controláveis enquanto outras são não controláveis, embora possam ser controláveis para efeito de teste. Muitas vezes, os fatores não controláveis são chamados de ruído (PENTEADO, 2011).

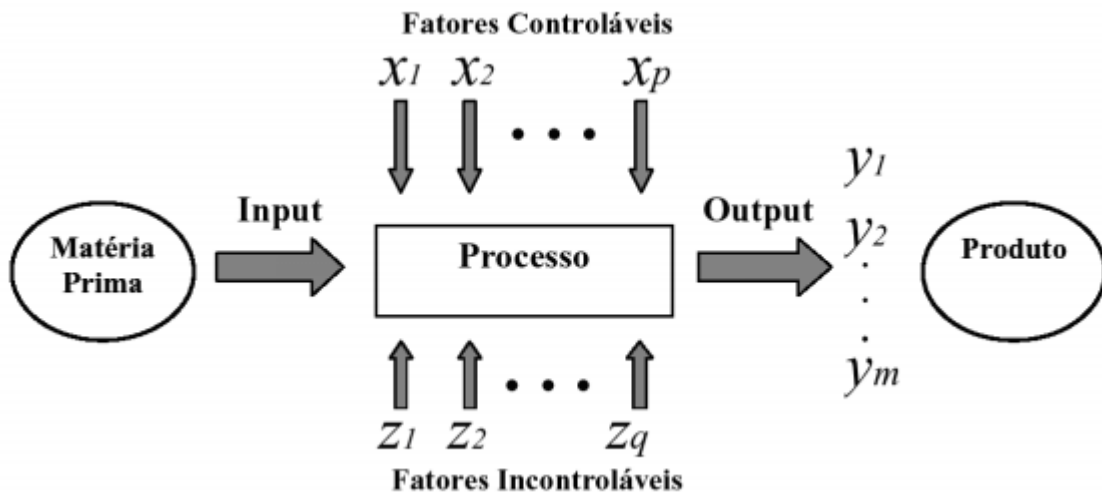


Figura 12- Modelo geral de um processo ou sistema – Adaptado de Montgomery 2005 (Penteado, 2011)

Para avaliar o nível de significância do modelo, bem como quais entre seus termos são significativos e quais não são e assim podem ser removidos, utiliza-se a análise de variância (ANOVA). O ajuste dos modelos é representado pelo coeficiente de determinação (R^2), que representa o percentual de variação da resposta que o modelo em questão é capaz de explicar. Quanto maior o valor de R^2 mais explicativo é o modelo, melhor o modelo se ajusta aos dados. Há ainda outras análises importantes, como o teste de falta de ajuste (*Lack-of-fit – LOF*) que deve ser maior que o nível de significância ($LOF > 5\%$), e a análise dos resíduos, os quais devem ser normais, aleatórios e não correlacionados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Para o desenvolvimento do trabalho foi utilizado como metal base o aço-carbono estrutural ASTM A-36, em forma de barra chata, com espessura de 6,35 mm. Foi realizado solda sobre chapa (*bead on plate* - BOP) utilizando-se o processo GMAW acoplado ao módulo STT[®] em uma fonte de soldagem *Power Wave 350* do fabricante *Lincoln Electric*. Para a análise das características geométricas, as amostras foram preparadas utilizando-se técnicas metalográficas, sendo submetidas a macroscopia ótica. A melhor condição observada foi repetida em junta de topo com chanfro em V de 45° sem abertura de raiz, e os corpos de prova (CPs), soldados em STT[®] e GMAW Convencional, preparados para os ensaios de tração e microdureza, bem como medição da penetração em face e largura de ZTA.

3.1.1 Metal Base

O Material utilizado como metal base foi barra chata de aço ASTM A-36, de medida 1"x1/4" ou 25,4x6,35 mm. Os corpos de prova foram cortados em comprimento de 100 mm. A Figura 13 ilustra a montagem da junta como soldada.

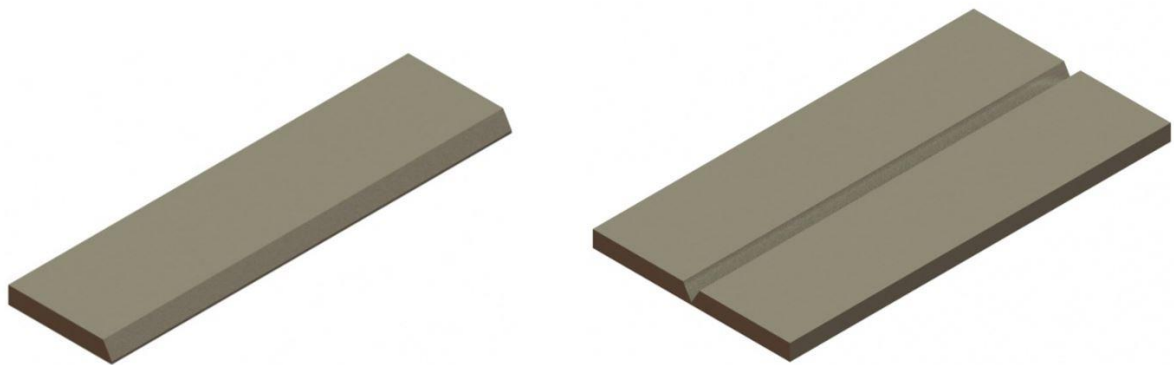


Figura 13- Ilustração do CP e sua montagem na junta a ser soldada

A Tabela 4 apresenta a composição química do metal base utilizado, conforme certificado de qualidade do material emitido pelo fornecedor.

Tabela 4: Composição química do aço ASTM A-36

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
% min	0,03	0,2	0	0	0	0	0	0
% máx	0,23	1,5	0,5	0,04	0,05	0,35	0,35	0,05

3.1.2 Metal de Adição

O metal de adição utilizado foi o eletrodo AWS ER70S-6 com bitola de 1,0 mm. A Tabela 5 fornece a composição química do eletrodo, conforme a norma (AWS A5.18/A5.18M, 2005).

Tabela 5: Composição química do eletrodo ER70S-6 ESAB

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu
% min	0,06	1,4	0,8	0	0	0	0	0	0	0
% máx	0,15	1,85	1,15	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,5

3.1.3 Gás de Proteção

Para proteção da poça de fusão foi utilizado duas misturas de Ar-CO₂, uma mistura C8, contendo 92% de argônio e 8% de CO₂, e uma C25 contendo 25% de CO₂.

3.1.4 Equipamentos

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Soldagem e Inovação Tecnológica (LABSit) do CEFET-MG Campus Varginha, em uma bancada experimental, montada especificamente com o objetivo de padronizar a execução e garantir repetibilidade. A Figura 14 apresenta a bancada de ensaios, a qual tem o movimento de seus três eixos (x, y e z) realizados por motores de passo, que por sua vez são controlados pelo computador.



Figura 14- Bancada Experimental

O equipamento de soldagem utilizado no projeto é uma fonte multiprocessos *Power Wave 350* do fabricante *Lincoln Electric*, com um módulo STT[®] acoplado, conforme apresentado na Figura 15.



Figura 15- Fonte de Soldagem Power Wave 350

3.2 Métodos

3.2.1 Método Experimental

O projeto foi desenvolvido seguindo algumas etapas preestabelecidas, conforme mostra o fluxograma da Figura 16.

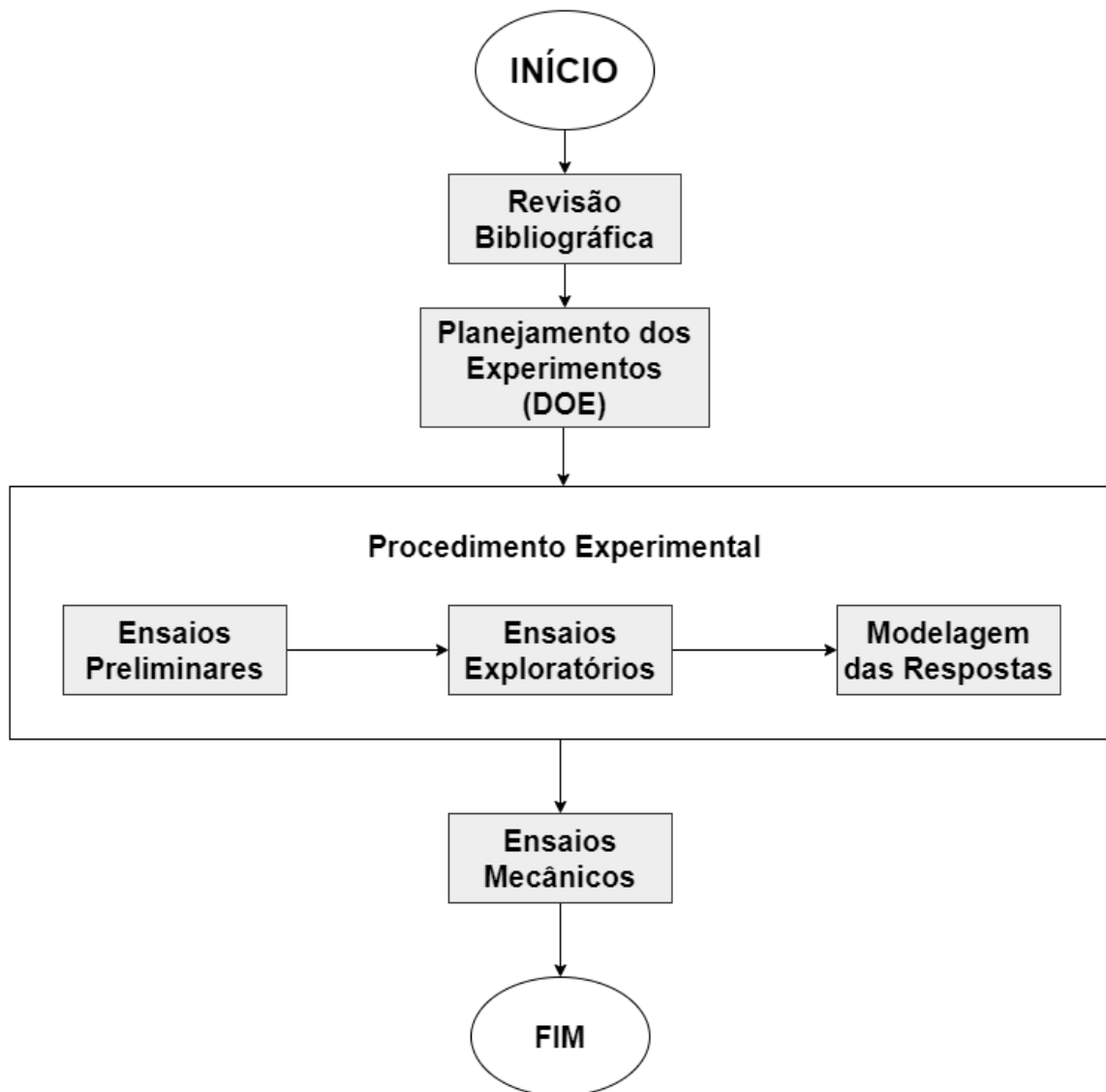


Figura 16- Etapas da Pesquisa

Na etapa de testes preliminares, partindo dos dados trabalhados por Silva (2018), que utilizou o mesmo processo em sua pesquisa, procurou-se estabelecer níveis de parâmetros de máquina que permitissem realizar um cordão de solda com bom aspecto superficial. Nessa fase do trabalho, as correntes de pico e base foram ajustadas acima para aumentar a energia do processo e produzir cordões mais largos, ainda em transferência por curto-circuito, que

pudessem favorecer um único passe de raiz quando as melhores condições fossem repetidas em chanfro. As amostras foram cortadas, atacadas e submetidas a uma avaliação visual do aspecto do cordão e da penetração.

Após ajustar o range de trabalho das variáveis, na etapa de análise exploratória foi elaborado um planejamento fatorial fracionado 2^{k-1} com 6 pontos centrais, para os 5 parâmetros de máquina, mantendo fixo o gás de proteção, para observar se algum desses fatores pudessem não ser influentes nas respostas e verificar a presença de curvatura. Não foi encontrado curvatura nas respostas e observou-se que o parâmetro *Tail Out* (To) não demonstrou exercer influência significativa em nenhuma das respostas. Por esse motivo, na próxima etapa do projeto optou-se por fixar esse parâmetro em seu nível inferior.

Uma vez que as respostas não apresentaram curvatura, a etapa seguinte consistiu em um planejamento fatorial completo 2^k com duas réplicas, considerando quatro variáveis contínuas e uma categórica (Gás), ajustados conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6: Fatores de entrada e seus respectivos níveis de variação

Parâmetros	Notação	Unidade	Níveis de Trabalho	
			-1	+1
Corrente de Pico	Ip	A	260	320
Corrente de Base	Ib	A	110	140
Velocidade de Alimentação	Va	m/min	5,5	6,5
Velocidade de Soldagem	Vs	cm/min	31,8	46,2
Gás de Proteção	Gás	-	C8	C25
<i>Tail-Out</i>	To	-		6
Vazão do Gás	Q	l/min		15
Distância Bico de contato peça	DBCP	mm		15

Nessa altura do projeto, buscou-se modelar a relação das variáveis de entrada, inclusive a mistura de proteção, com as respostas de interesse da solda, e obter bons ajustes das equações de regressão.

A Figura 17 sintetiza o escopo do projeto relacionando as cinco variáveis de entrada e as oito respostas analisadas na etapa de modelagem.

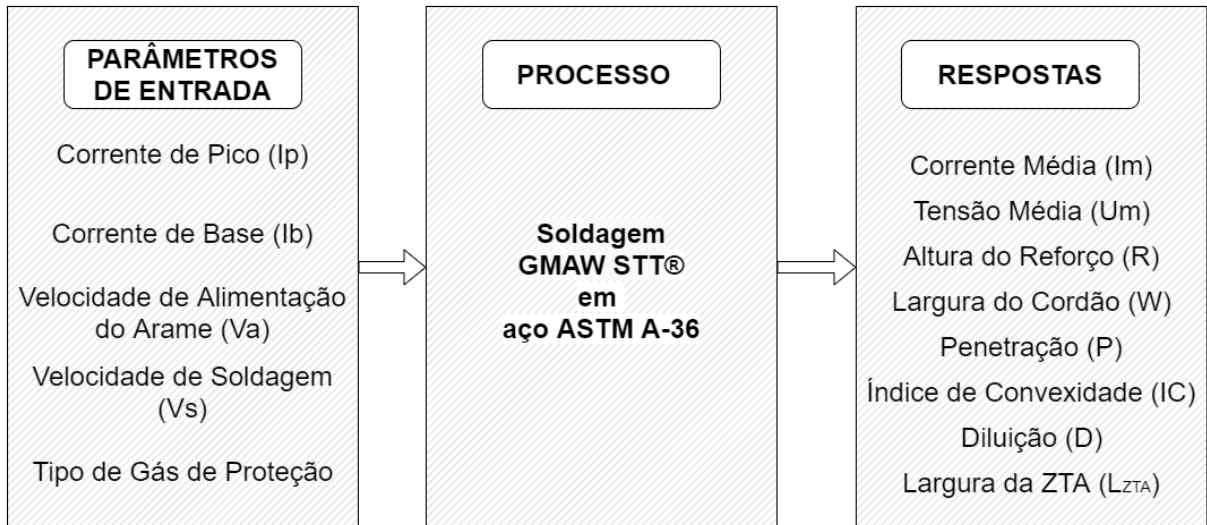


Figura 17- Escopo do Projeto

A última etapa do projeto consistiu em repetir a melhor condição das soldas BOP em chanfro e submeter os CPs aos ensaios mecânicos de tração e microdureza, bem como medição de penetração em face e largura da ZTA. Essa condição, considerada como a configuração que proporcionou os maiores valores de penetração e largura, também foi executada em GMAW convencional (sem controle de curto-circuito) para comparação com o STT®.

O valor médio de tensão ($V_m = 19,3V$) associado à Velocidade de alimentação do arame ($V_a = 6,5m/min$), alcançados na soldagem com os parâmetros da melhor condição, foram utilizados para configuração do processo GMAW Convencional.

3.2.2 Preparação das amostras para Soldagem

Os corpos de prova foram cortados em comprimento de 100mm. Em todas as etapas, antes de realizar as soldas, os CPs foram limpos para retirar a oxidação da superfície e melhorar o contato elétrico. Nos ensaios preliminares e nos exploratórios foi utilizado solda sobre chapa. Nos ensaios finais os CPs foram chanfrados, como mostra a Figura 18, sendo o ângulo do bisel em $22,5^\circ$ e nariz de 0,5mm.

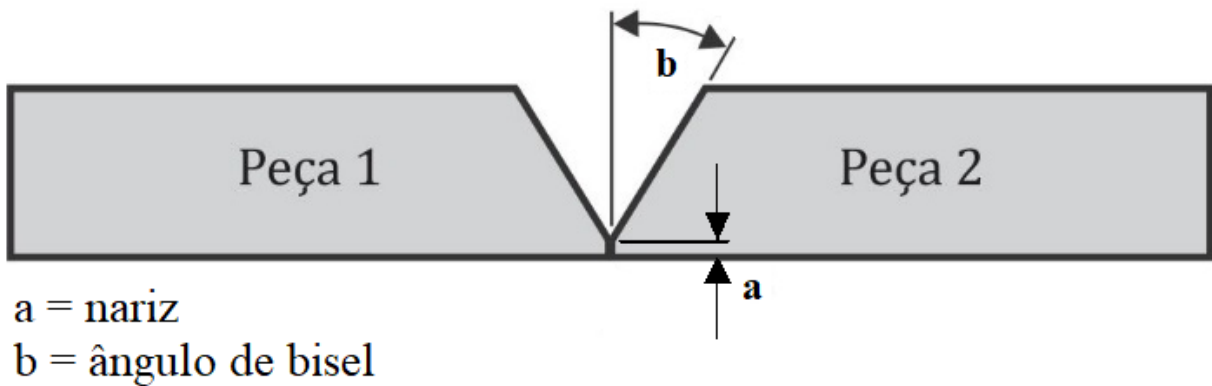


Figura 18- Desenho da junta e indicação de suas respectivas dimensões

3.2.3 Preparação das amostras para Caracterização Geométrica

Toda a preparação dos corpos de prova para macrografia foi realizada no Laboratório de Metalografia do CEFET-MG, Campus-VIII em Varginha.

A preparação das amostras para macrografia e medição das características geométricas dos cordões aconteceu pelo corte dos CPs na região de interesse para análise, desconsiderando as partes iniciais e finais do cordão, por meio do uso de uma cortadeira de amostras Arotec, modelo Arocor-40. As amostras já cortadas foram embutidas posteriormente em baquelite por meio de uma embutidora Arotec PRE 30Mi.

Após serem embutidas, as peças foram atacadas com Nital 4% e as medidas geométricas foram tomadas em um estereoscópio Olympus SZ-61, montado com uma câmera acoplada para aquisição das imagens. As imagens foram capturadas e mensuradas utilizando o software *Analysis* do mesmo fabricante do estereoscópio.

A Figura 19 ilustra o estereoscópio utilizado para realizar a captura das imagens dos cordões de solda.



Figura 19- Estereoscópio utilizado na pesquisa

A Figura 20 ilustra a geometria de um dos cordões de solda BOP obtidos no experimento, com as respectivas medições.

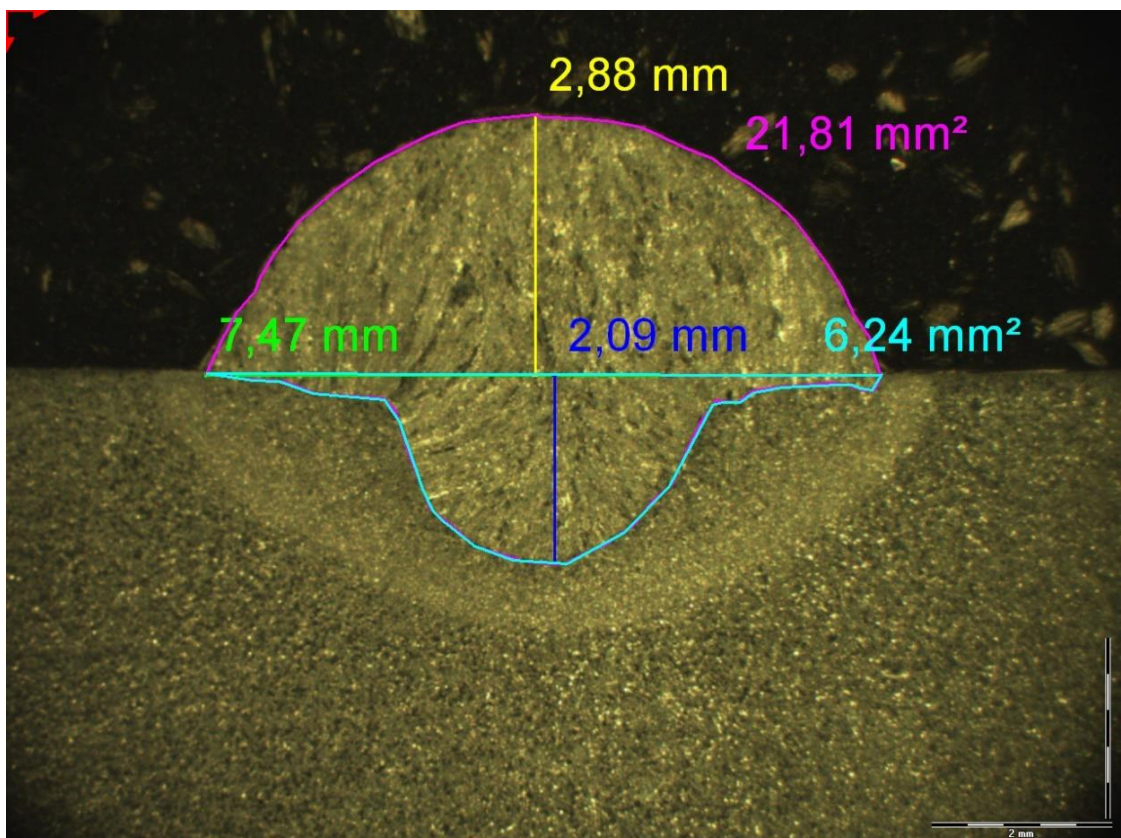


Figura 20- Medidas geométricas feitas nos corpos de prova

Após serem executadas as soldas e coletados os dados geométricos, estes foram lançados no software e conduzido uma análise de variância (ANOVA) para determinar os coeficientes das variáveis e o quanto a mudança dessas, de um nível inferior para um superior, afeta a resposta em estudo. A ANOVA permite determinar os coeficientes de cada variável e a equação de regressão que descreve a resposta de interesse. A análise dos dados considerou um índice de confiabilidade de 95%, o que indica que toda fonte de variação que apresenta um valor-p (*P-value*) igual ou menor que 0,05 (5%), é dita significativa, em outras palavras, exerce influência na resposta analisada.

Com o objetivo de auxiliar na análise dos dados foram plotados gráficos de efeitos padronizados de pareto e de resíduos, bem como gráficos de efeito principal (*Main Effects plot*) e interações (*Interaction Plot*), quando aplicável, para cada resposta analisada.

O uso da ferramenta estatística também auxiliou na análise das soldas realizadas em chanfro para verificar se entre os processos em estudo havia diferenças estatísticas nas respostas desejadas, a saber Largura de ZTA e Penetração em face.

A Largura da ZTA foi medida nos dois lados em 12 pontos, perpendicular à parede do chanfro, como ilustra a Figura 21. Para determinar a Penetração em face considerou-se o mesmo método de medição.

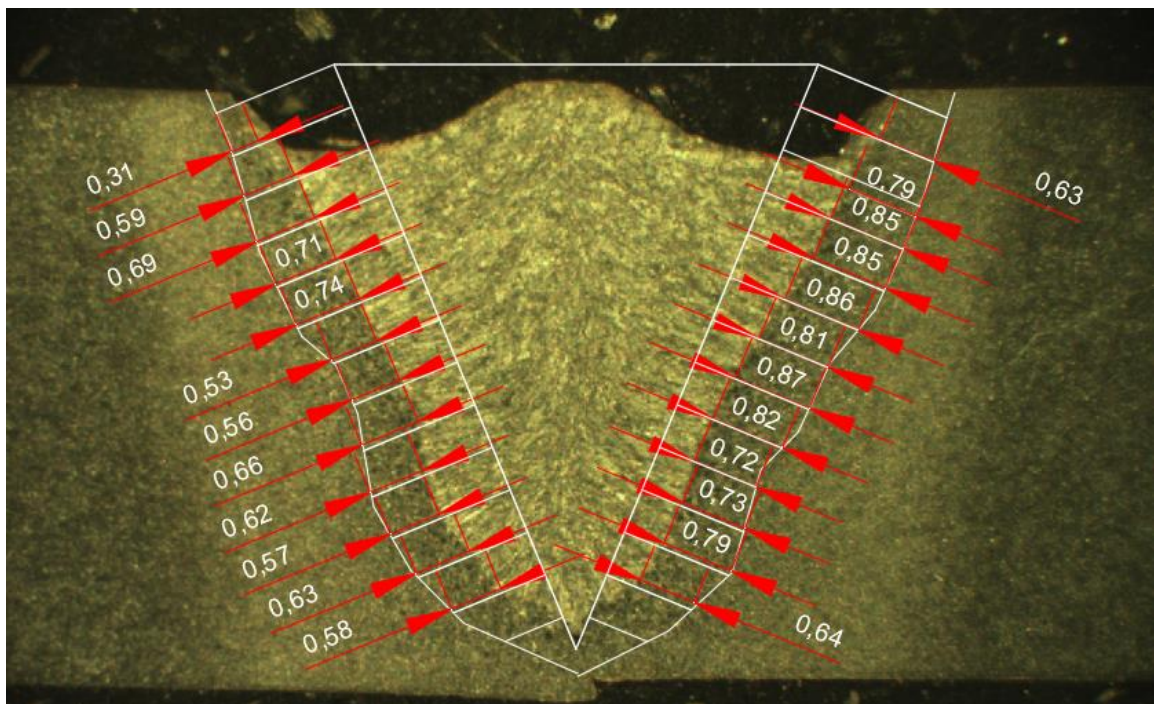


Figura 21- Medição de Largura da ZTA

No capítulo seguinte os resultados dessas análises serão apresentados e discutidos.

3.2.4 Ensaios Mecânicos

3.2.4.1 Ensaio de Tração

Após análise dos resultados geométricos gerados nas fases preliminares e exploratória, a condição que apresentou maior penetração e largura do cordão foi repetida em corpos de prova chanfrados, tanto no processo convencional quanto no STT[®], e a partir desses conduzido o ensaio mecânico de tração, em que os CPs foram usinados nas dimensões necessárias, conforme norma NBR6152. Também foi realizado ensaio para o metal base, para efeito comparativo do estudo.

O ensaio de tração foi realizado no Laboratório de Ensaios Destrutivos e Não Destrutivos (LEN) do Instituto de Engenharia Mecânica (IEM) da Universidade Federal de Itajubá. A Figura 22 representa o equipamento INSTRON, o qual foi utilizado para realização do ensaio.



Figura 22- Equipamento de Ensaio de Tração

A Figura 23 apresenta as medidas, em milímetros, do CP que foi usinado para o ensaio de tração e indica a localização da junta soldada.



Figura 23- CP usinado para o ensaio de tração

Foram feitos três ensaios de tração para cada combinação de processo (GMAW ou STT[®]) e gás de proteção (C8 ou C25), o que totalizou 12 ensaios.

3.2.4.2 Ensaio de Microdureza

Outra propriedade de interesse na pesquisa foi a Microdureza, sobretudo da região crítica da solda, a ZTA. O ensaio de microdureza foi conduzido no Laboratório de Metalurgia e Materiais (LMM) do Instituto de Engenharia Mecânica da UNIFEI.

O ensaio foi realizado em amostras das soldas feitas em chanfro. Para tal foi utilizado um microdurômetro digital, da marca Time Group, conforme ilustra a Figura 24.



Figura 24- Microdurômetro modelo TH712

Para o ensaio foi utilizado carga de 1,96N e tempo de 15s. O método de medição adotado foi o Vickers (HV) e as medições foram feitas em 30 pontos do CP, tomados a cada 1mm ou 0,5mm, em 3 alturas diferentes da solda, distanciados entre 1,5mm a partir da superfície da chapa, conforme Figura 25.

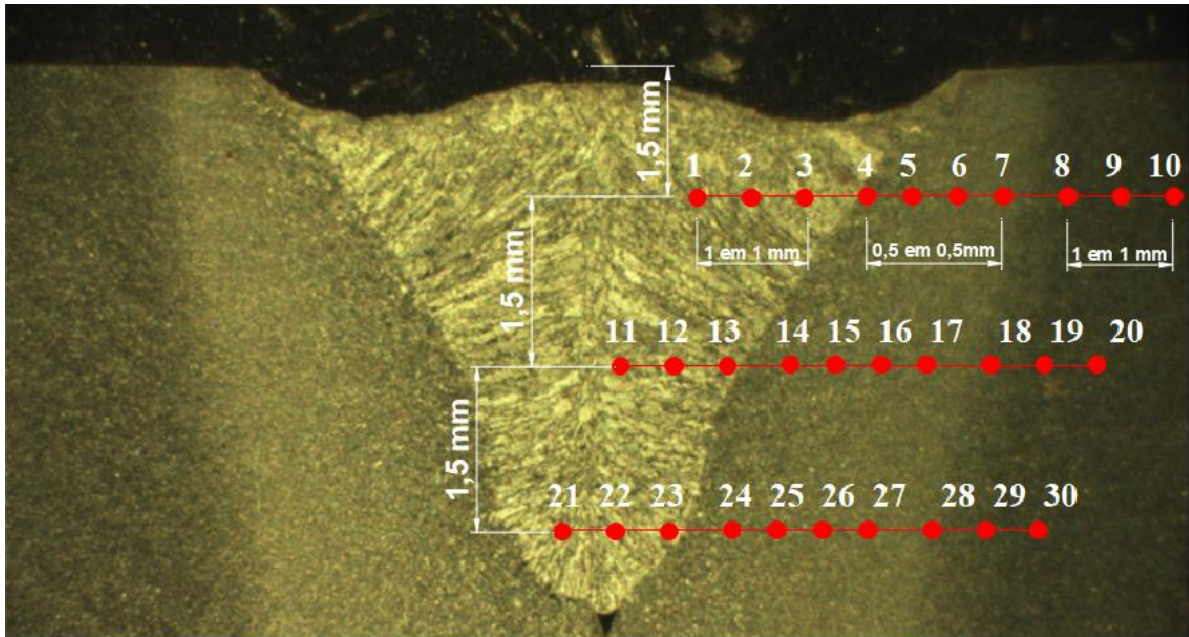


Figura 25- Medições de Microdureza

A partir das medições realizadas, os valores de microdureza coletados foram inseridos no software estatístico para determinar se estatisticamente os processos GMAW Convencional e STT[®] produzem soldas com microdureza diferentes. Optou-se por realizar um teste ANOVA utilizando todos os resultados encontrados para cada uma das regiões (MB, MA e ZTA).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para estruturar a discussão dos resultados esta seção foi dividida em 4 partes: Matriz de Experimentos das soldas em STT[®], Análise Qualitativa das Soldas em STT[®], Características Geométricas das Soldas no Processo STT[®] e Juntas Soldadas em Chanfro – STT[®] x GMAW.

4.1 Matriz de Experimentos das soldas em STT[®]

Após realizar a macrografia das amostras ensaiadas e coletar a medição das características geométricas de cada cordão, os dados foram inseridos na matriz de experimentos e então analisados com auxílio do software estatístico.

A Tabela 7 exibe todas as condições da matriz experimental com os respectivos valores de geometria – Altura do reforço, Largura do cordão, Penetração, Índice de Convexidade (IC), Diluição e Energia. Esses dados são das soldas sobre chapa no processo STT[®].

Tabela 7: Dados Coletados nos Experimentos de Soldagem STT sobre chapa

CP	Variáveis de Entrada					Respostas					
	Ip	Ib	Va	Vs	Gás	Reforço	Largura	Penetração	IC	Diluição	Energia
						[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[%]	[J/cm]
1	-1	-1	-1	-1	C8	2,59	6,93	1,66	37	27	4867
2	1	-1	-1	-1	C8	2,45	7,97	1,36	31	28	5205
3	-1	1	-1	-1	C8	2,21	9,16	1,56	24	33	6568
4	1	1	-1	-1	C8	2,2	9,29	1,38	24	31	6721
5	-1	-1	1	-1	C8	2,88	7,47	2,09	39	29	5175
6	1	-1	1	-1	C8	2,82	8,31	1,59	34	25	5510
7	-1	1	1	-1	C8	2,64	8,51	2,02	31	33	6198
8	1	1	1	-1	C8	2,56	8,78	1,89	29	32	6515
9	-1	-1	-1	1	C8	2,15	6,45	1,35	33	28	3376
10	1	-1	-1	1	C8	2,15	6,69	1,27	32	27	3517
11	-1	1	-1	1	C8	1,82	7,66	1,3	24	33	4508
12	1	1	-1	1	C8	1,69	8,01	1,22	21	34	4699
13	-1	-1	1	1	C8	2,28	7,15	1,43	32	29	3582
14	1	-1	1	1	C8	2,38	7,02	1,62	34	30	3759
15	-1	1	1	1	C8	2,24	7,1	1,48	32	31	4220
16	1	1	1	1	C8	2,09	7,57	1,5	28	35	4473

17	-1	-1	-1	-1	C25	2,47	7,9	1,73	31	30	5237
18	1	-1	-1	-1	C25	2,37	8,35	1,92	28	35	5498
19	-1	1	-1	-1	C25	2,2	9,39	1,86	23	36	6648
20	1	1	-1	-1	C25	2,07	9,54	1,82	22	41	6980
21	-1	-1	1	-1	C25	2,7	8,21	2,4	33	34	5559
22	1	-1	1	-1	C25	2,69	9,1	2,08	30	30	5838
23	-1	1	1	-1	C25	2,44	9,11	2,1	27	36	6378
24	1	1	1	-1	C25	2,47	9,25	1,9	27	34	6794
25	-1	-1	-1	1	C25	2,1	6,93	1,62	30	33	3624
26	1	-1	-1	1	C25	1,85	7,37	1,4	25	36	3780
27	-1	1	-1	1	C25	1,72	7,87	1,62	22	43	4530
28	1	1	-1	1	C25	1,61	8,65	1,4	19	42	4813
29	-1	-1	1	1	C25	2,26	7,28	1,69	31	33	3865
30	1	-1	1	1	C25	2,1	8,01	1,76	26	35	4059
31	-1	1	1	1	C25	2,1	7,55	2,05	28	39	4429
32	1	1	1	1	C25	1,96	8,11	1,74	24	40	4352
33	-1	-1	-1	-1	C8	2,59	7,39	1,56	35	27	4965
34	1	-1	-1	-1	C8	2,55	7,7	1,5	33	26	5129
35	-1	1	-1	-1	C8	2,23	9,11	1,25	24	29	6572
36	1	1	-1	-1	C8	1,97	9,62	1,75	20	37	6723
37	-1	-1	1	-1	C8	2,78	8,14	1,53	34	25	5180
38	1	-1	1	-1	C8	2,74	8,6	1,63	32	27	5422
39	-1	1	1	-1	C8	2,66	8,45	1,81	31	30	6136
40	1	1	1	-1	C8	2,56	9,01	1,89	28	32	6514
41	-1	-1	-1	1	C8	2,15	6,5	1,26	33	27	3361
42	1	-1	-1	1	C8	2,1	7,02	1,27	30	28	3507
43	-1	1	-1	1	C8	1,65	7,9	1,32	21	36	4532
44	1	1	-1	1	C8	1,73	7,82	1,1	22	32	4618
45	-1	-1	1	1	C8	2,34	6,62	1,39	35	29	3501
46	1	-1	1	1	C8	2,38	6,99	1,45	34	28	3704
47	-1	1	1	1	C8	2,24	7,1	1,53	32	33	4239
48	1	1	1	1	C8	2,11	7,81	1,46	27	32	4458
49	-1	-1	-1	-1	C25	2,47	7,86	1,94	31	31	5165
50	1	-1	-1	-1	C25	2,43	8,47	1,89	29	33	5516
51	-1	1	-1	-1	C25	2,15	9,09	1,88	24	38	6710
52	1	1	-1	-1	C25	2,08	9,26	1,89	22	39	6822

53	-1	-1	1	-1	C25	2,64	8,12	2,08	33	35	5525
54	1	-1	1	-1	C25	2,49	9,11	1,81	27	33	5858
55	-1	1	1	-1	C25	2,56	8,7	2,5	29	39	6264
56	1	1	1	-1	C25	2,59	9,95	2	26	35	6709
57	-1	-1	-1	1	C25	1,94	7,17	1,67	27	36	3622
58	1	-1	-1	1	C25	1,98	7,54	1,42	26	36	3840
59	-1	1	-1	1	C25	2,11	8,05	1,62	26	38	4455
60	1	1	-1	1	C25	1,76	7,72	1,73	23	43	4640
61	-1	-1	1	1	C25	2,11	7,62	1,67	28	35	3845
62	1	-1	1	1	C25	2,21	7,53	1,75	29	35	3995
63	-1	1	1	1	C25	2,14	8,36	1,56	26	36	4303
64	1	1	1	1	C25	1,98	7,91	2,07	25	45	4663

Os resultados de Energia foram determinados por meio do cálculo do Aporte Térmico, aplicada para os valores médios de corrente e tensão coletados. A equação abaixo (3) apresenta o cálculo de Energia.

$$E = \frac{60 * V * I}{V_s} \quad (3)$$

Sendo:

V = tensão média

I = corrente média

V_s = Velocidade de Soldagem (cm/min)

4.2 Análise Qualitativa das Soldas em STT[®]

Uma análise visual das soldas realizadas indica a obtenção de um bom acabamento superficial em praticamente todas as condições e pouca ou nenhuma ocorrência de respingos, o que está de acordo com as informações encontradas na literatura acerca do processo STT[®]. A Figura 26 ilustra uma das condições testadas (solda BOP) e sua respectiva réplica.

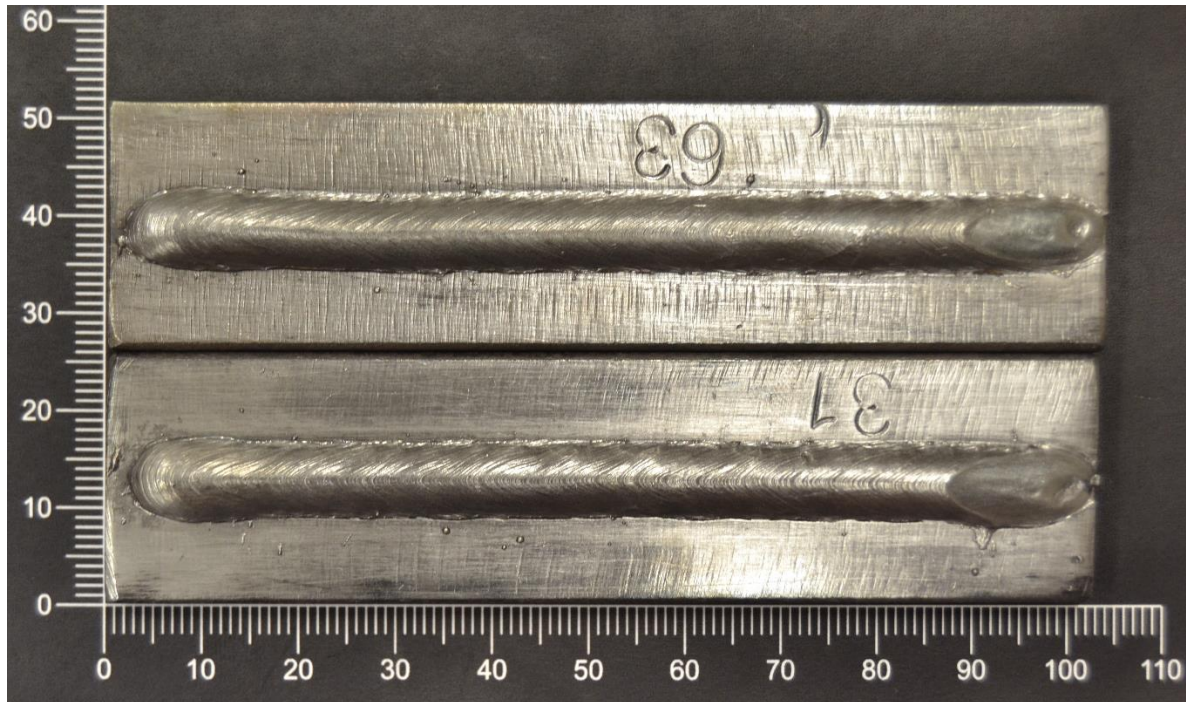


Figura 26- Corpo de prova nº31 e réplica

Outro aspecto observado foi que em nenhuma das condições testadas houve falta de fusão nas laterais do cordão de solda, diferentemente do resultado encontrado por Fogliatto (2013). Entretanto, em acordo aos resultados obtidos por esse mesmo autor, a geometria dos cordões apresentou boa altura do reforço, larguras maiores que as penetrações, e a ocorrência do formato de dedo (*finger shape*) para maioria dos resultados encontrados. Ainda segundo o autor, o formato *finger* é comum para misturas ricas em Ar e está associado à concentração do calor na região central do arco ou ainda por uma possível maior força de arraste atuando sobre as gotas em transferência.

Na Figura 20 é possível observar a elevada altura do reforço, a largura bem grande em relação à penetração e a característica de *finger* no formato do cordão.

4.3 Características Geométricas das Soldas no Processo STT[®]

A determinação da influência dos parâmetros sobre a geometria do cordão foi realizada com auxílio de um software estatístico, por meio do qual executou-se um planejamento de experimentos.

A seguir é apresentado e discutido a influência dos parâmetros de entrada nas principais características geométricas do cordão de solda – altura do reforço, largura, penetração, diluição e índice de convexidade.

4.3.1 Altura do reforço

Os resultados da ANOVA para o Reforço são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Análise de Variância para Altura do Reforço

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	18	5,85111	0,32506	54,77	0,000
Linear	5	5,57779	1,11556	187,97	0,000
Ip	1	0,09302	0,09302	15,67	0,000
Ib	1	0,90250	0,90250	152,07	0,000
Va	1	1,44000	1,44000	242,64	0,000
Vs	1	2,98426	2,98426	502,85	0,000
Gás	1	0,15801	0,15801	26,62	0,000
Interações de 2 fatores	10	0,23294	0,02329	3,92	0,001
Ip*Ib	1	0,01323	0,01323	2,23	0,142
Ip*Va	1	0,00722	0,00722	1,22	0,276
Ip*Vs	1	0,00016	0,00016	0,03	0,872
Ip*Gás	1	0,00391	0,00391	0,66	0,421
Ib*Va	1	0,11223	0,11223	18,91	0,000
Ib*Vs	1	0,00456	0,00456	0,77	0,386
Ib*Gás	1	0,05406	0,05406	9,11	0,004
Va*Vs	1	0,00951	0,00951	1,60	0,212
Va*Gás	1	0,02806	0,02806	4,73	0,035
Vs*Gás	1	0,00002	0,00002	0,00	0,949
Interações de 3 fatores	3	0,04039	0,01346	2,27	0,093
Ip*Ib*Vs	1	0,01266	0,01266	2,13	0,151
Ip*Vs*Gás	1	0,01822	0,01822	3,07	0,087
Ib*Va*Gás	1	0,00951	0,00951	1,60	0,212
Erro	45	0,26706	0,00593		
Falta de ajuste	13	0,04236	0,00326	0,46	0,929
Erro Puro	32	0,22470	0,00702		
Total	63	6,11817			

O modelo obtido para o reforço do cordão apresentou um ótimo ajuste, como pode ser visto na Tabela 9, em que o R^2 ajustado ficou acima dos 80%.

Tabela 9: Ajustes para resposta do Reforço

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,0770371	95,63%	93,89%	91,17%

A equação de regressão do modelo de Reforço (4) foi calculada também com auxílio do software, e é apresentada a seguir.

$$\begin{aligned}
 \text{Reforço (mm)} = & 12,89 - 0,0224 I_p - 0,0843 I_b - 0,471 V_a - 0,175 V_s - 2,07 \text{ Gás} \quad (4) \\
 & + 0,000137 I_p \cdot I_b + 0,000708 I_p \cdot V_a + 0,000535 I_p \cdot V_s \\
 & + 0,00279 I_p \cdot \text{Gás} + 0,00558 I_b \cdot V_a + 0,001337 I_b \cdot V_s \\
 & + 0,01169 I_b \cdot \text{Gás} - 0,00339 V_a \cdot V_s + 0,161 V_a \cdot \text{Gás} \\
 & + 0,0227 V_s \cdot \text{Gás} - 0,000004 I_p \cdot I_b \cdot V_s - 0,000078 I_p \cdot V_s \cdot \text{Gás} \\
 & - 0,00163 I_b \cdot V_a \cdot \text{Gás}
 \end{aligned}$$

Para verificar a influência de cada uma das variáveis e suas interações nas respostas de interesse foi utilizado o gráfico de Pareto. A Figura 27 apresenta o efeito das variáveis estudadas no reforço do cordão.

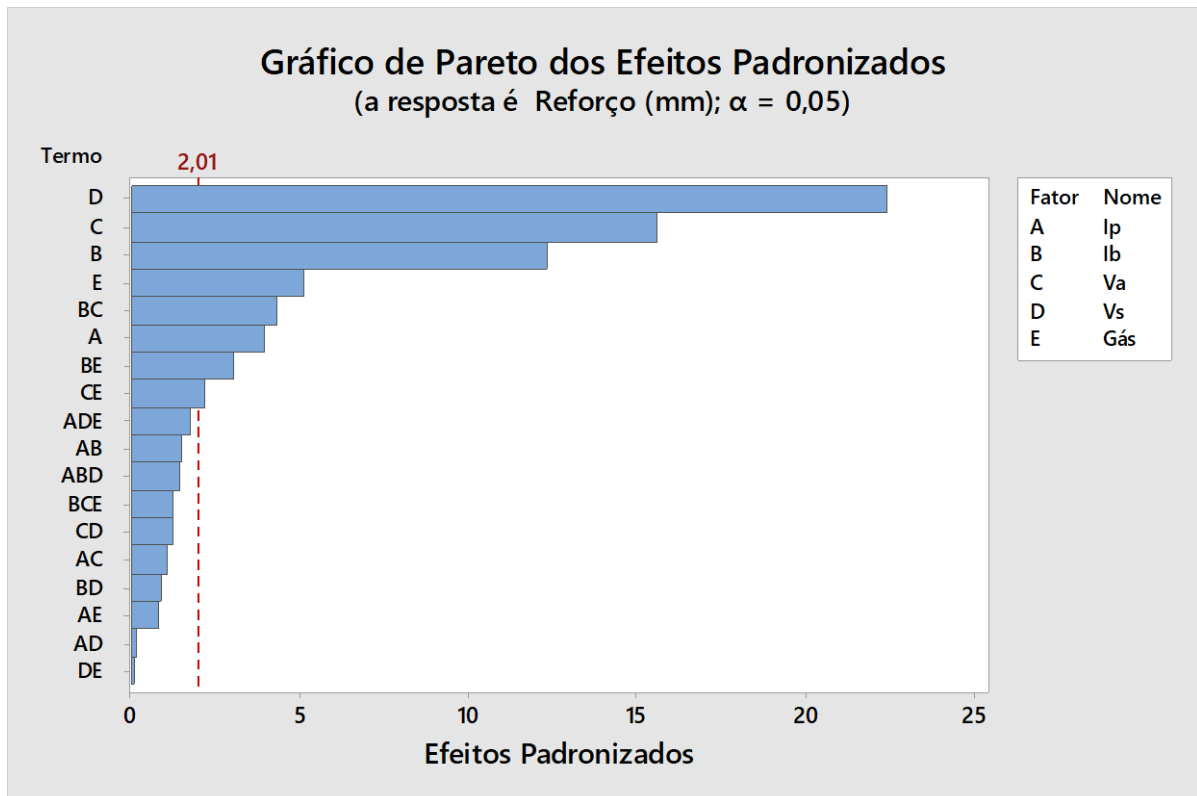


Figura 27- Gráfico de Pareto para o Reforço

Pode-se observar, pela análise do gráfico apresentado, que todas as variáveis em estudo demonstraram exercer influência, em maior ou menor grau, no reforço do cordão. O parâmetro mais influente foi a Velocidade de soldagem (V_s), seguido da Velocidade de alimentação (V_a), Corrente de base (I_b), o tipo de Gás de proteção e a Corrente de pico (I_p). Além dos efeitos principais, três interações foram significativas, sendo elas a Corrente de base com a Velocidade

de alimentação ($I_b \cdot V_a$), a Corrente de base com o Gás de proteção ($I_b \cdot \text{Gás}$) e Velocidade de alimentação com o gás ($V_a \cdot \text{Gás}$).

O modo como cada variável afeta a resposta pode ser visualizado no gráfico de efeitos principais. Para a altura do reforço, o gráfico dos efeitos de cada parâmetro de entrada é demonstrado na Figura 28.

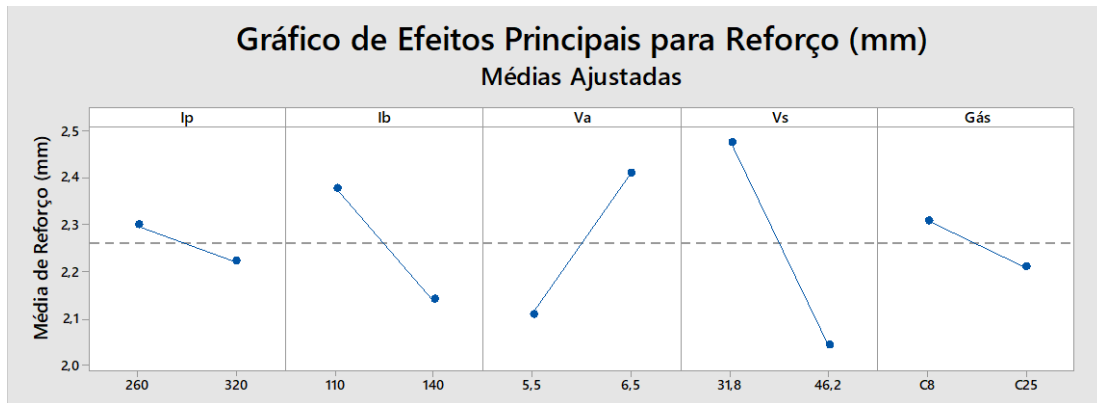


Figura 28- Gráfico de Efeitos Principais para o Reforço

Observa-se que o reforço aumenta com o aumento da velocidade de alimentação de arame, e reduz com a variação positiva das demais variáveis de entrada, inclusive com o aumento de CO_2 no gás de proteção.

A velocidade de alimentação (V_a) determina a quantidade de arame eletrodo que é fundido e depositado durante o processo de soldagem. O aumento desse parâmetro, considerando uma mesma velocidade de deslocamento da tocha (V_s), resulta em uma quantidade maior de metal transferido à peça por unidade de comprimento, e por consequência no aumento do reforço (CHANDRASEKARAN *et al.*, 2019, MURUGAN; PARMAR, 1994). O efeito da velocidade de soldagem (V_s) pode ser explicado da mesma forma, já que sua alteração também modifica a quantidade de material depositado por comprimento linear da peça, porém de maneira inversa visto que o aumento da deposição, e, portanto, do reforço do cordão, ocorre para menores velocidades de deslocamento (V_s).

No estudo de Chandrasekaran *et al* (2019), os autores mantiveram a tensão do arco elétrico constante por considerarem que esse parâmetro, no processo GMAW, não exercia influência no reforço do cordão. No presente trabalho, pela análise dos sinais elétricos das soldas percebe-se que maiores correntes de base e de pico estão associadas a maiores tensões, ou seja, **a tensão é influenciada diretamente pelos ajustes de corrente do processo STT®** (conforme Figura 29). Ao mesmo tempo, os valores maiores de corrente resultam em um menor

reforço do cordão de solda, portanto pode-se dizer que a tensão influencia a altura do reforço, pois está associada à molhabilidade da solda.

O efeito do gás de proteção no reforço do cordão pode ser explicado, tendo como base a literatura estudada e mencionada na revisão deste trabalho, conforme Wang *et al* (2014), pela ação do teor de CO₂ na elevação da temperatura do arco e dimensões da poça de fusão, e consequente maior transferência de calor à solda.

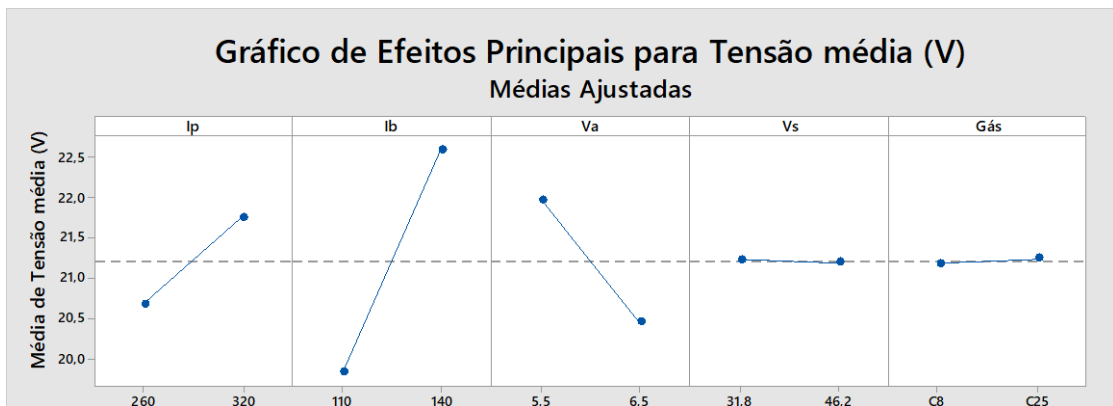


Figura 29- Gráfico de Efeitos Principais na Tensão Média

Como mencionado anteriormente, a resposta do reforço é influenciada por duas interações significativas, que são ($I_b * V_a$) e ($I_b * \text{Gás}$). No trabalho de Chandrasekaran *et al.*, (2019), utilizando GMAW, a interação das variáveis Gás e Velocidade de alimentação (V_a) demonstrou ser significativa para a medida do reforço. Sabe-se que no processo convencional existe uma relação direta da velocidade de alimentação com a corrente fornecida pela máquina durante a solda. Já no processo STT[®], a corrente média demonstrou ter relação direta com os parâmetros de I_b e V_a , como é ilustrado na Figura 30. Portanto, pode-se considerar que o gás de proteção e a corrente do processo exercem influência conjunta na resposta em questão.

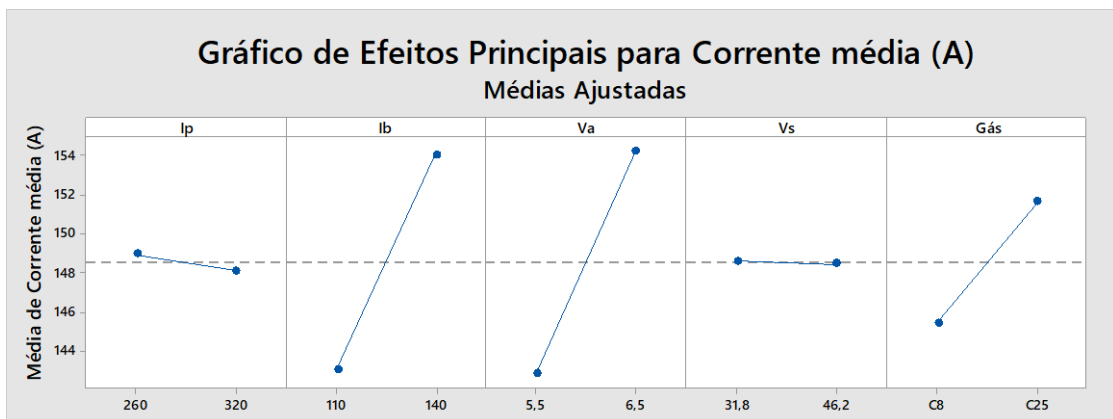


Figura 30- Gráfico de Efeitos Principais para Corrente Média

Todas as interações encontradas para a resposta do reforço puderam ser ilustradas por meio do gráfico de interação, o qual é apresentado na Figura 31.

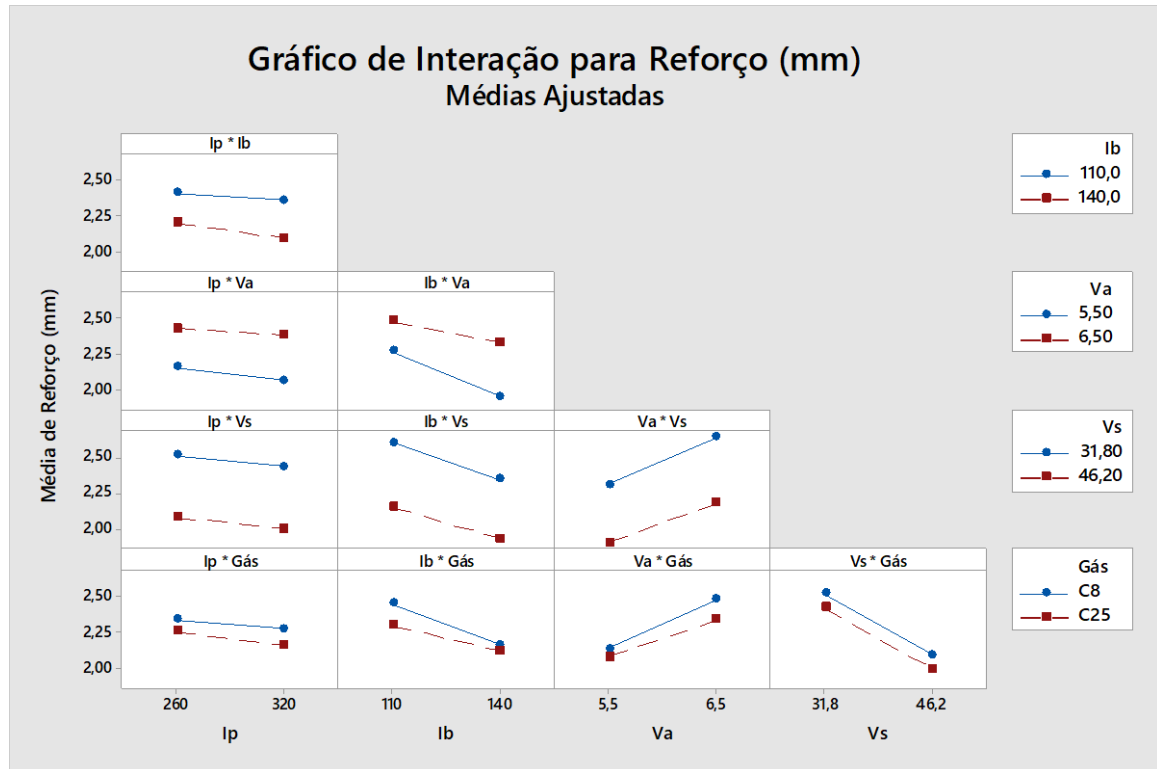


Figura 31- Gráfico de Interação para o Reforço

A análise das interações significativas ($I_b * V_a$, $I_b * Gás$ e $V_a * Gás$) demonstra que o efeito da corrente de base é maior em menor velocidade de alimentação, em maior I_b o uso de gás C8 ou C25 produz a mesma resposta de reforço e o efeito da mudança dos gases é ligeiramente maior em velocidades de alimentação mais altas.

Além dos gráficos anteriormente apresentados, os quais fornecem uma boa noção sobre a influência dos parâmetros de entrada do processo no reforço do cordão, é importante também analisar os resíduos, a fim de garantir que estão normalmente distribuídos e são aleatórios e independentes, ou seja, não seguem um padrão. Dessa forma garante-se que os resíduos não estejam mascarando os resultados obtidos, e que estes sejam adequadamente descritos pelos modelos.

Os gráficos dos resíduos do reforço são apresentados na Figura 32. Pela análise dos mesmos observa-se que os resíduos são aleatorizados e independentes e seguem uma distribuição normal ($P\text{-value} > 0,05$).

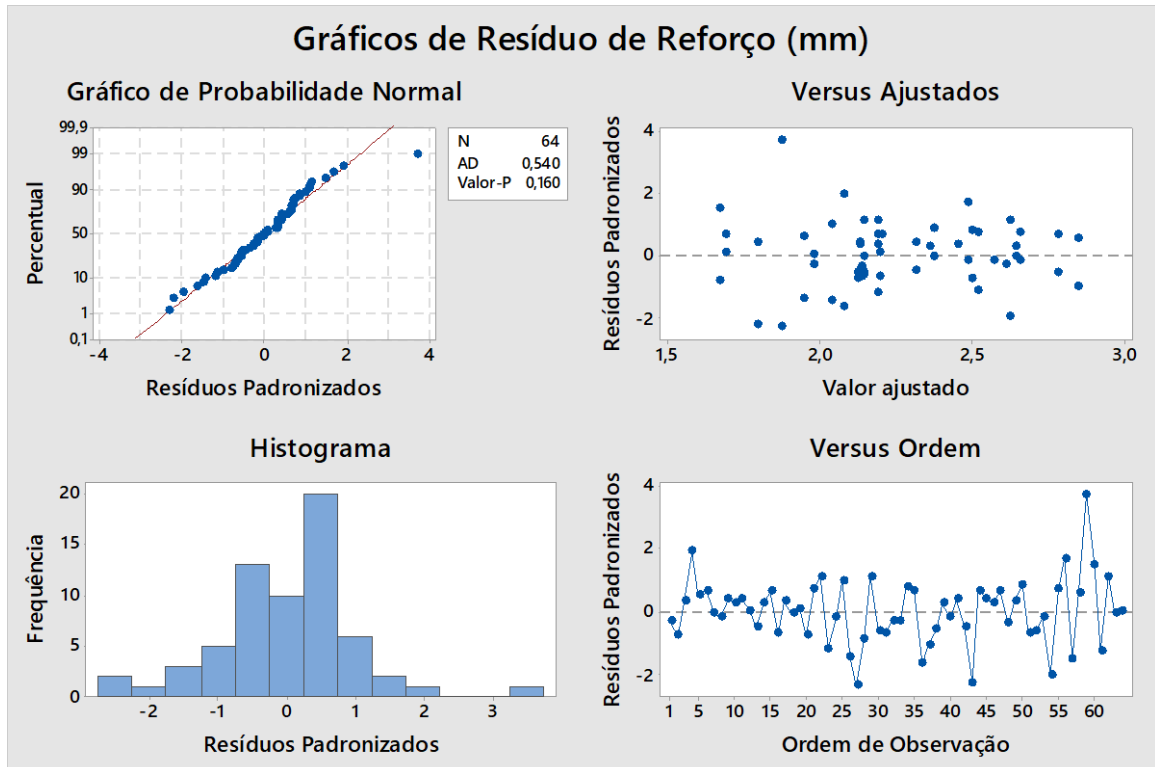


Figura 32- Gráfico de Resíduos para o Reforço

4.3.2 Largura do cordão

Os resultados da ANOVA para a Largura do cordão são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Análise de Variância para Largura do Cordão

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	18	43,7253	2,4292	41,46	0,000
Linear	5	39,7122	7,9424	135,56	0,000
Ip	1	2,7349	2,7349	46,68	0,000
Ib	1	12,1539	12,1539	207,43	0,000
Va	1	0,0736	0,0736	1,26	0,268
Vs	1	21,1255	21,1255	360,56	0,000
Gás	1	3,6243	3,6243	61,86	0,000
Interações de 2 fatores	10	3,6116	0,3612	6,16	0,000
Ip*Ib	1	0,1269	0,1269	2,17	0,148
Ip*Va	1	0,0570	0,0570	0,97	0,329
Ip*Vs	1	0,2903	0,2903	4,95	0,031
Ip*Gás	1	0,0001	0,0001	0,00	0,963
Ib*Va	1	2,2164	2,2164	37,83	0,000
Ib*Vs	1	0,4373	0,4373	7,46	0,009
Ib*Gás	1	0,2513	0,2513	4,29	0,044
Va*Vs	1	0,0311	0,0311	0,53	0,470
Va*Gás	1	0,1754	0,1754	2,99	0,090

Vs*Gás	1	0,0260	0,0260	0,44	0,509
Interações de 3 fatores	3	0,4016	0,1339	2,28	0,092
Ip*Va*Vs	1	0,0722	0,0722	1,23	0,273
Ib*Va*Vs	1	0,0953	0,0953	1,63	0,209
Ib*Va*Gás	1	0,2340	0,2340	3,99	0,052
Erro	45	2,6366	0,0586		
Falta de ajuste	13	0,4334	0,0333	0,48	0,918
Erro Puro	32	2,2033	0,0689		
Total	63	46,3620			

Os dados que conferem o resultado apresentado para a Largura do cordão também tiveram um ótimo ajuste, acima de 90%, conforme indicado na Tabela 11.

Tabela 11: Ajustes para resposta da Largura

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,242057	94,31%	92,04%	88,50%

A equação de regressão do modelo que descreve a Largura do cordão (5) é apresentada a seguir.

$$\begin{aligned}
 \text{Largura (mm)} = & -22,1 - 0,0533 I_p + 0,404 I_b + 2,80 V_a + 0,138 V_s + 6,06 Gás \quad (5) \\
 & - 0,000099 I_p * I_b + 0,0141 I_p * V_a + 0,00155 I_p * V_s \\
 & + 0,00005 I_p * Gás - 0,0527 I_b * V_a - 0,00505 I_b * V_s - 0,0526 I_b * Gás \\
 & - 0,005 V_a * V_s - 0,903 V_a * Gás + 0,00280 V_s * Gás \\
 & - 0,000311 I_p * V_a * V_s + 0,000715 I_b * V_a * V_s + 0,00806 I_b * V_a * Gás
 \end{aligned}$$

Para melhor visualizar a influência das variáveis tem-se o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados, conforme ilustra a Figura 33.

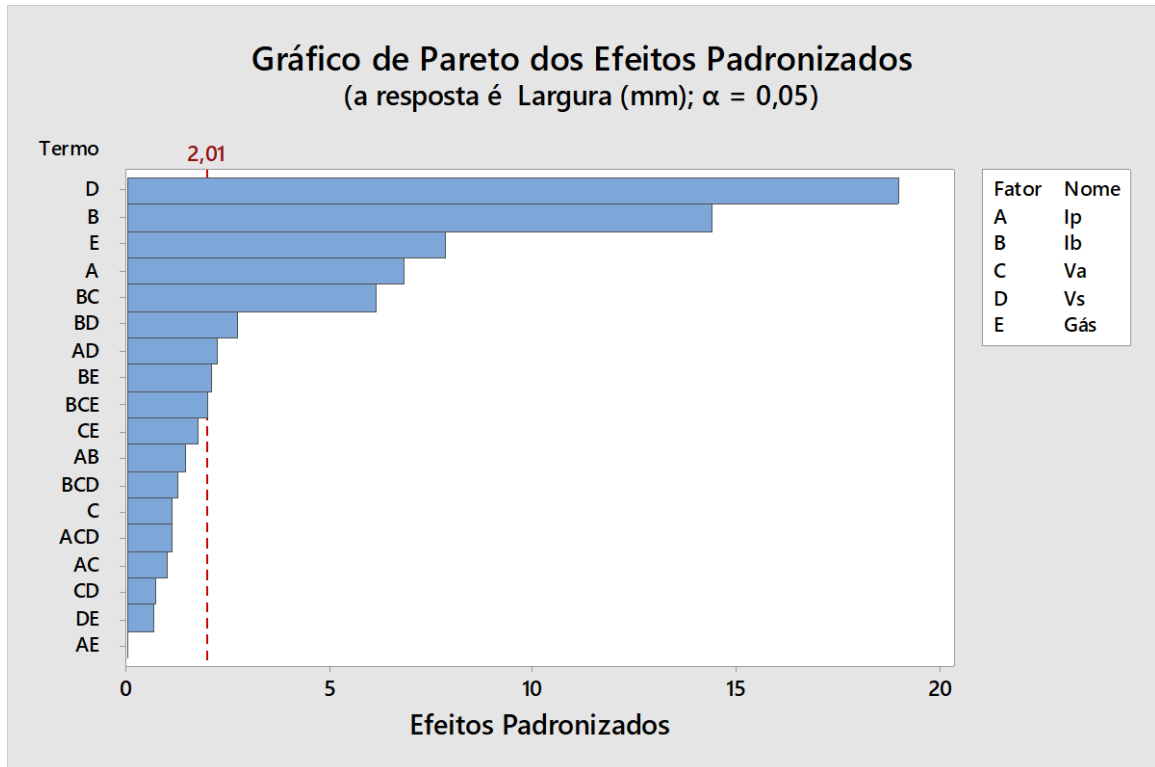


Figura 33- Gráfico de Pareto para a Largura

As variáveis que mais influenciaram na Largura do cordão foram a Velocidade de soldagem (V_s), Corrente de base (I_b), o tipo de Gás de proteção e a Corrente de pico (I_p). Além dos efeitos principais, quatro interações foram significativas na resposta da Largura, sendo elas: Corrente de base e Velocidade de alimentação ($I_b * V_a$), Corrente de base e Velocidade de Soldagem ($I_b * V_s$), Corrente de pico com Velocidade de Soldagem ($I_p * V_s$) e Corrente de base juntamente com o Gás ($I_b * \text{Gás}$).

A Velocidade de alimentação (V_a) não demonstrou exercer influência na resposta de maneira isolada, considerando o range em que os parâmetros foram selecionados. Entretanto, a combinação desta com uma outra variável (I_b) apresentou significância, devendo, portanto, ser incorporada ao modelo que descreve a Largura para que se mantenha a hierarquia do mesmo.

O modo como cada variável afeta a resposta pode ser visualizado no gráfico de efeitos principais. O efeito de cada variável de entrada na resposta da Largura é demonstrado na Figura 34.

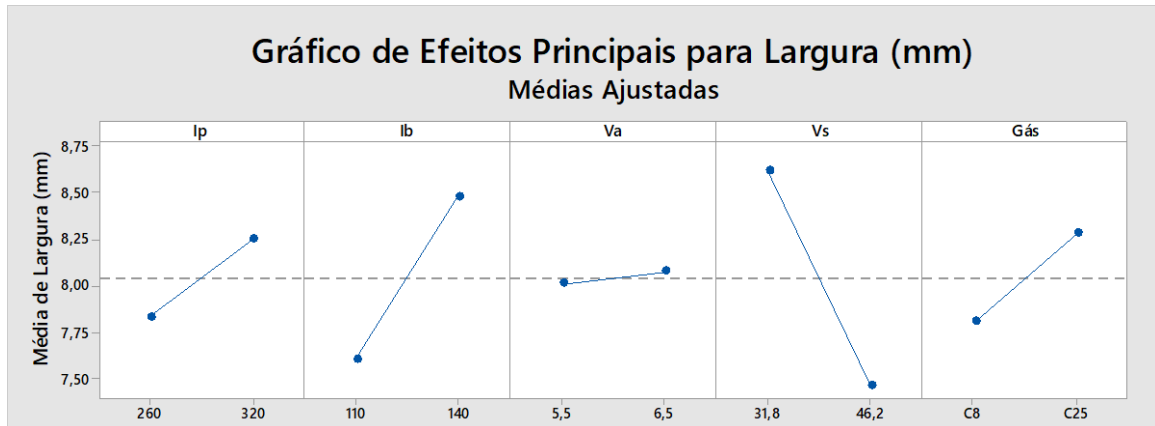


Figura 34- Gráfico de Efeitos Principais para a Largura

A análise do gráfico de efeitos principais para a Largura torna mais clara a compreensão do efeito isolado praticamente nulo de V_a . Verifica-se também que o aumento da velocidade de deslocamento da tocha (V_s) resulta na redução da Largura do cordão, ao passo que o aumento das correntes, de pico (I_p) e base (I_b), e da concentração de CO_2 na mistura gasosa (de 8% para 25%) leva a um aumento na resposta. A análise do gráfico comprova o maior efeito de V_s , seguido de I_b e o Gás de proteção.

O efeito produzido pela corrente de base (I_b) na largura do cordão está de acordo com o que foi encontrado por Costa (2011), o qual afirma que a redução de I_b diminui a corrente média do arco e consequentemente o calor imposto à solda, resultando na obtenção de cordões mais estreitos. Ainda segundo o autor, menores larguras estão associadas a menores tensões de soldagem (menor comprimento de arco), ao passo que o maior comprimento do arco resulta em cordões mais largos. Segundo Chandrasekaran *et al.*, (2019) e Murugan; Parmar (1994), no processo GMAW o aumento da tensão resulta em um aumento no comprimento e na largura do arco elétrico, devido incremento na velocidade do plasma e nas forças envolvidas na transferência, e dessa forma produz um cordão mais largo.

A análise dos sinais elétricos das soldas realizadas (Figuras 29 e 30) demonstram que maiores correntes de base (I_b) e de pico (I_p) estão associadas a maiores tensões e correntes elétricas, o que explica o efeito positivo desses parâmetros no aporte térmico e na largura do cordão. O aumento da velocidade de soldagem (V_s), por sua vez, gera redução na largura já que reduz a quantidade de calor e de material depositado por unidade de comprimento (CHANDRASEKARAN *et al.*, 2019).

Conforme Kou (2003) e Murugan; Gunaraj (2005), a largura geralmente depende da molhabilidade da poça de fusão e da área de projeção do cone do arco elétrico sob o metal de base – fatores determinados por diversos parâmetros, tais como tensão, gás de proteção,

velocidade de soldagem e temperatura do arco. Verifica-se portanto que a combinação de tais parâmetros favorecem o aumento da molhabilidade do cordão, com destaque para a influência do gás, cujo maior teor de CO₂, devido à maior condutividade térmica, produz um arco de maior temperatura e transfere mais calor à peça.

As interações significativas na resposta da largura podem ser visualizadas na Figura 35.

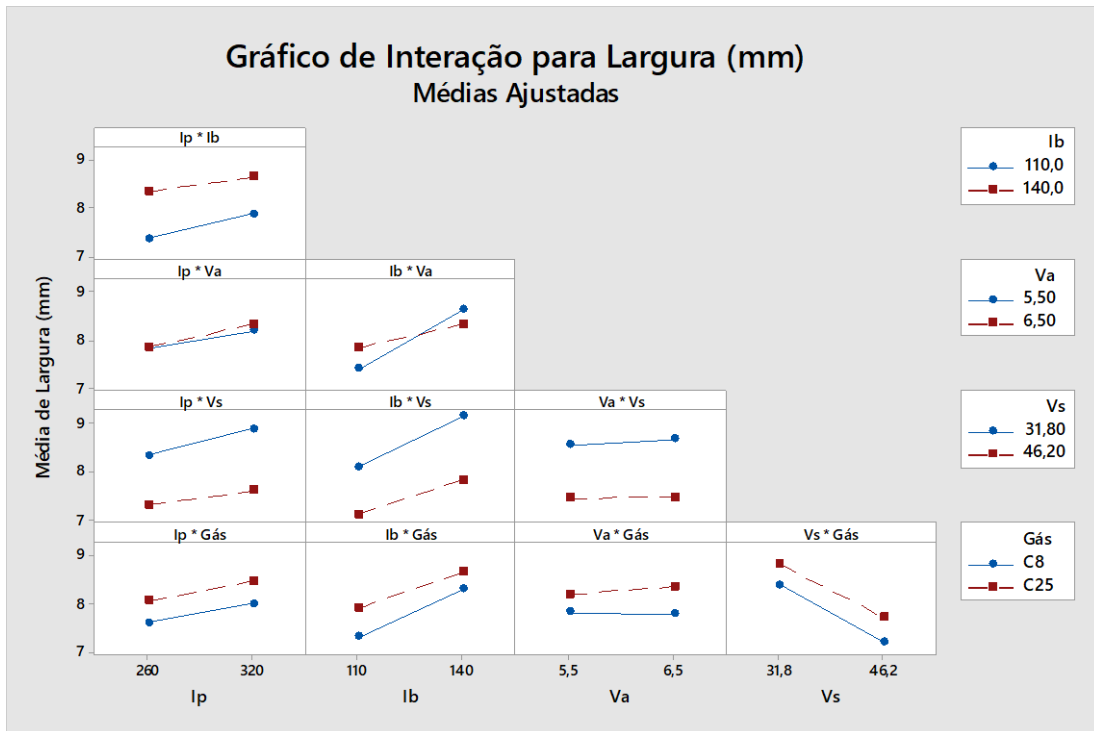


Figura 35- Gráfico de Interação para a Largura

A análise de resíduos para a Largura do cordão de solda também foi satisfatória. Como pode ser visto na Figura 36, os resíduos são aleatorizados, independentes e normalmente distribuídos, ou seja, não se pode afirmar que exista uma correlação ou padrão observável dos mesmos ($P\text{-value} > 0,05$).

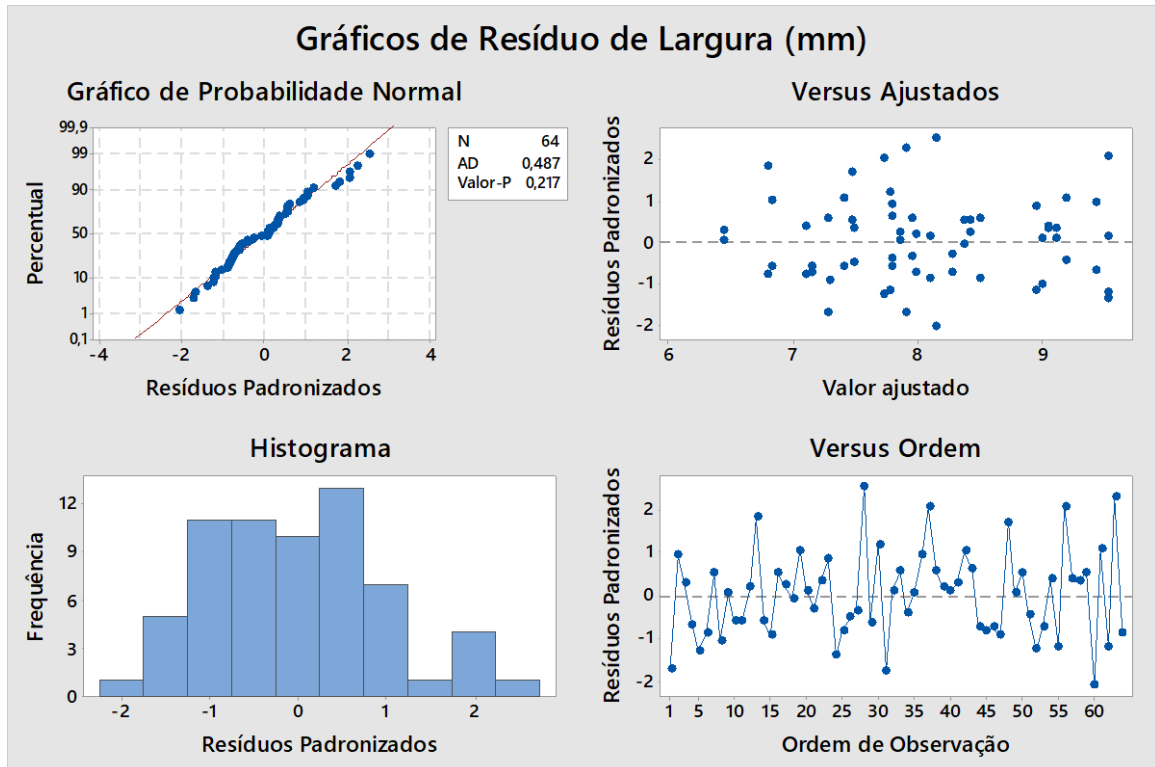


Figura 36- Gráfico de Resíduos para a Largura

4.3.3 Penetração

Considerando a resposta de penetração somente três fatores principais e uma interação tripla apresentaram significância estatística. O resultado da ANOVA com os coeficientes de cada variável ou interação e a respectiva estatística F e valores-p calculados podem ser visualizados na Tabela 12.

Tabela 12: Análise de Variância para Penetração

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	10	4,37050	0,43705	23,17	0,000
Linear	5	4,12032	0,82406	43,68	0,000
Ip	1	0,06695	0,06695	3,55	0,065
Ib	1	0,03106	0,03106	1,65	0,205
Va	1	0,98754	0,98754	52,35	0,000
Vs	1	1,42504	1,42504	75,54	0,000
Gás	1	1,60973	1,60973	85,33	0,000
Interações de 2 fatores	4	0,07899	0,01975	1,05	0,392
Ip*Va	1	0,00150	0,00150	0,08	0,779
Ip*Vs	1	0,02520	0,02520	1,34	0,253
Ib*Va	1	0,04254	0,04254	2,26	0,139
Va*Vs	1	0,00975	0,00975	0,52	0,475
Interações de 3 fatores	1	0,17119	0,17119	9,07	0,004

Ip*Va*Vs	1	0,17119	0,17119	9,07	0,004
Erro	53	0,99981	0,01886		
Falta de ajuste	21	0,23166	0,01103	0,46	0,967
Erro Puro	32	0,76815	0,02400		
Total	63	5,37031			

O ajuste da resposta penetração foi satisfatório, o valor de R² ajustado ficou muito próximo de 80%. A Tabela 13 mostra os níveis de ajuste alcançados.

Tabela 13: Ajustes para resposta da Penetração

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,137347	81,38%	77,87%	72,85%

O modelo que descreve a penetração do cordão, obtido pela equação de regressão (6), é apresentado a seguir.

$$\begin{aligned}
 \text{Penetração (mm)} &= -29,1 + 0,1093 I_p - 0,0192 I_b + 5,46 V_a + 0,806 V_s + 0,1586 Gás & (6) \\
 &- 0,01900 I_p * V_a - 0,002781 I_p * V_s + 0,00344 I_b * V_a - 0,1423 V_a * V_s \\
 &+ 0,000479 I_p * V_a * V_s
 \end{aligned}$$

O Pareto dos efeitos principais mostra de forma mais visual a influência das variáveis e interações, conforme indicado na Figura 37.

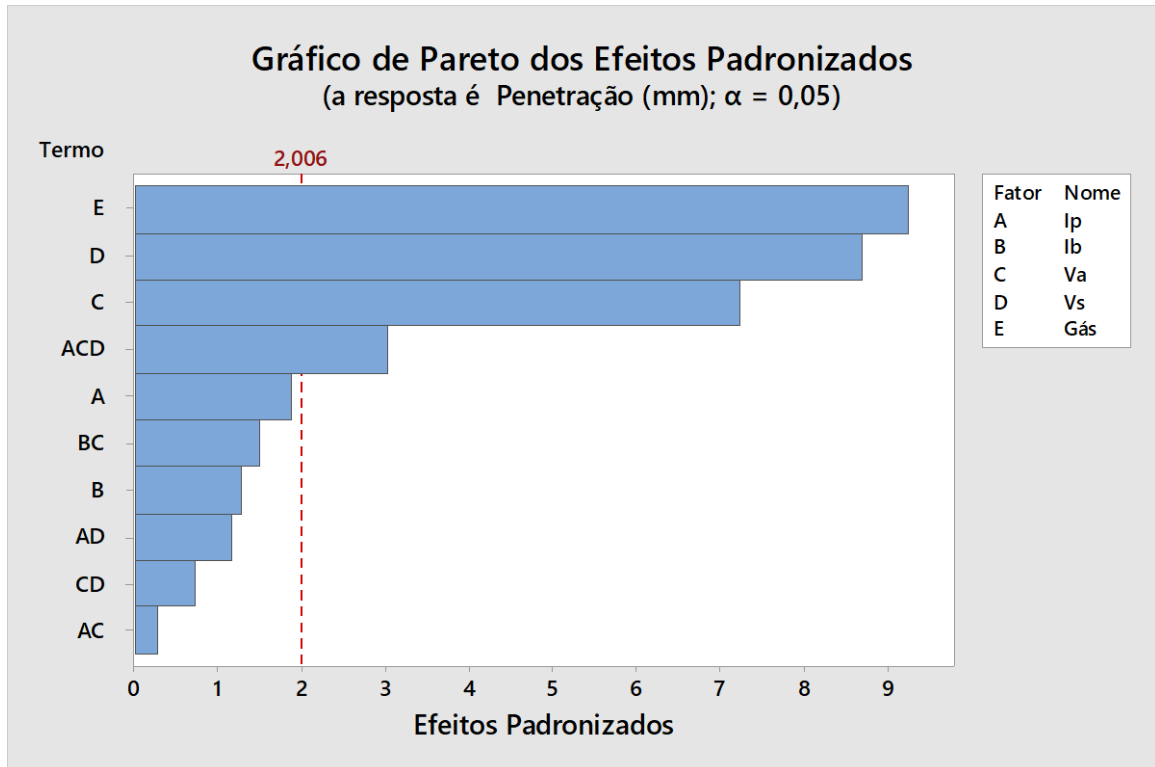


Figura 37- Gráfico de Pareto para a Penetração

Observa-se que a penetração é mais influenciada pelo tipo de Gás de proteção utilizado na soldagem, seguido da Velocidade de soldagem (V_s) e da Velocidade de alimentação (V_a). A única interação significativa na resposta da penetração foi a combinação da Corrente de pico com as Velocidades de alimentação e de soldagem ($I_p * V_a * V_s$).

A magnitude e sentido dos efeitos das variáveis principais na resposta da penetração podem ser vistos na Figura 38.

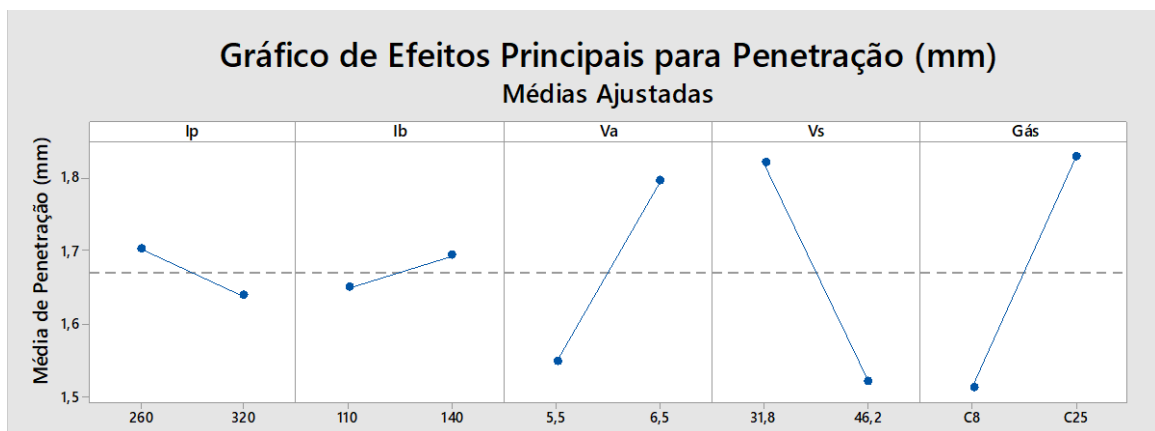


Figura 38- Gráfico de Efeitos Principais na Penetração

Por meio da análise dos efeitos dos parâmetros é possível verificar como o gás influencia mais fortemente a resposta, seguido de V_s e V_a . Aumento na concentração de CO_2 e na velocidade de alimentação resultam em um aumento na penetração do cordão. Diferentemente disso, com o acréscimo da velocidade de soldagem ocorre uma diminuição na penetração. As correntes de base e pico não exercem influência se variadas isoladamente.

Karadeniz; Ozsarac; Yildiz (2007), em seus estudos sobre os parâmetros do processo GMAW, encontraram que corrente e velocidade de deslocamento são as variáveis mais significativas na penetração do cordão. Na pesquisa realizada por Chandrasekaran *et al* (2019), utilizando o mesmo processo, tanto o gás de proteção quanto a velocidade do arame demonstraram grande influência na soldagem.

Segundo Murugan; Parmar (1994), devido ao aumento da velocidade de alimentação uma maior quantidade de metal é fundida e depositada sobre o cordão de solda, o que acarreta o aumento da penetração.

No processo com uso da tecnologia STT[®], observa-se, pelos resultados obtidos, que a velocidade de soldagem é realmente um parâmetro muito significativo, o que pode ser atribuído ao seu grande efeito no aporte térmico, pois menores velocidades permitem maior deposição de material e aumento de entrada de calor na solda, o que gera cordões de maior penetração. Já a corrente média do processo está diretamente relacionada com a velocidade de alimentação, a corrente de base e o gás de proteção, conforme apresentado na Figura 30. Os parâmetros V_a e Gás também afetam, no mesmo sentido, a penetração do cordão, o que indica uma influência do nível de corrente nessa resposta.

Esses resultados estão de acordo com o que foi encontrado na literatura, que estabelece que a maior força de Lorentz, provocada pelo aumento da corrente elétrica, é o fator que explica o aumento da resposta de penetração (KOU, 2003). No processo em estudo, como já mencionado, tanto V_a como o gás de proteção, fatores influentes na profundidade do cordão, tem relação direta com a corrente média fornecida pela máquina durante a solda. Chandrasekaran *et al.*, (2019), atribuem o efeito do gás na penetração ao aumento de sua condutividade térmica.

A relação encontrada entre a Velocidade de alimentação de arame e o aumento da corrente média, é similar ao processo GMAW convencional. Entretanto, cabe ressaltar aqui a existência, na soldagem STT[®], do parâmetro de Corrente de base (I_b), que também exerce influência positiva na corrente do processo e permite que se possa aumentar a entrada de calor na solda sem que seja necessário alterar a taxa de alimentação do arame.

Nenhuma interação de 2ª ordem foi significativa, mas uma interação tripla mostrou influenciar a resposta ($I_p * V_a * V_s$).

A análise dos resíduos para a resposta da penetração do cordão não foi satisfatória, o valor-p menor que 5% indica que os resíduos do modelo não seguem a normalidade. Portanto, não se pode concluir que os dados estão bem ajustados. A Figura 39 mostra os gráficos dos resíduos da penetração.

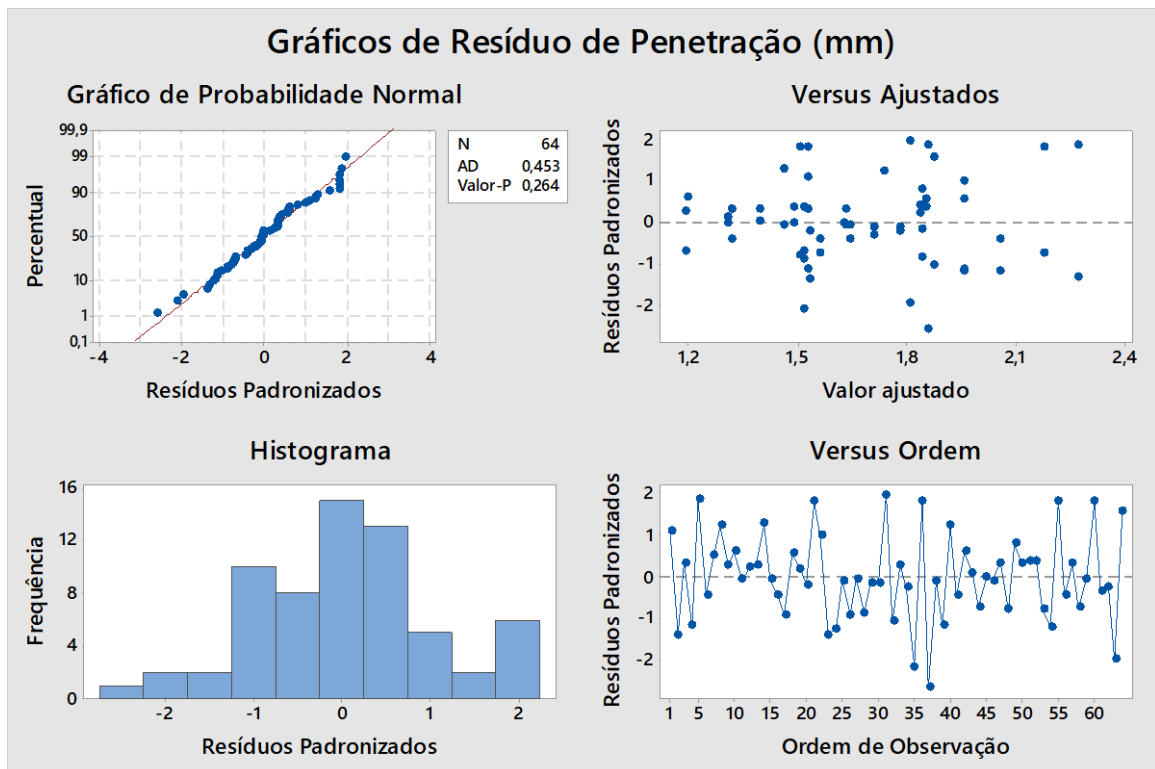


Figura 39- Gráfico de Resíduos para a Penetração

4.3.4 Convexidade

A convexidade é outra informação importante sobre as características geométricas do cordão de solda. De acordo com Silva; Ferraresi; Scotti (2000), a relação do reforço com a largura do cordão é desejável quando fica próximo a 30%.

O índice de convexidade do cordão de solda também foi avaliado e o resultado obteve ajuste acima de 80%. A Tabela 14 apresenta os resultados da ANOVA.

Tabela 14: Análise de Variância para Convexidade

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	10	0,117678	0,011768	56,02	0,000
Linear	5	0,103520	0,020704	98,57	0,000
Ip	1	0,009752	0,009752	46,42	0,000
Ib	1	0,057002	0,057002	271,37	0,000
Va	1	0,018564	0,018564	88,38	0,000
Vs	1	0,002889	0,002889	13,75	0,001
Gás	1	0,015314	0,015314	72,91	0,000
Interações de 2 fatores	4	0,013019	0,003255	15,49	0,000
Ib*Va	1	0,007439	0,007439	35,42	0,000
Ib*Vs	1	0,000689	0,000689	3,28	0,076
Ib*Gás	1	0,003752	0,003752	17,86	0,000
Va*Gás	1	0,001139	0,001139	5,42	0,024
Interações de 3 fatores	1	0,001139	0,001139	5,42	0,024
Ib*Va*Gás	1	0,001139	0,001139	5,42	0,024
Erro	53	0,011133	0,000210		
Falta de ajuste	21	0,003183	0,000152	0,61	0,881
Erro Puro	32	0,007950	0,000248		
Total	63	0,128811			

Os ajustes obtidos no resultado de análise do índice de convexidade são apresentados na Tabela 15. O valor de R² ajustado acima de 80% indica um bom ajuste do modelo.

Tabela 15: Ajustes da resposta de Convexidade

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,0144932	91,36%	89,73%	87,40%

A regressão gerou uma equação que descreve o índice de convexidade do cordão em função dos parâmetros de entrada do processo. A equação de regressão do modelo que descreve a convexidade (7) pode ser vista abaixo.

$$\begin{aligned}
 \text{Convexidade} = & 1,710 - 0,000411 I_p - 0,01180 I_b - 0,1456 V_a - 0,00473 V_s \\
 & - 0,451 \text{ Gás} + 0,001438 I_b * V_a + 0,000030 I_b * V_s \\
 & + 0,00389 I_b * \text{Gás} + 0,0619 V_a * \text{Gás} \\
 & - 0,000563 I_b * V_a * \text{Gás}
 \end{aligned} \quad (7)$$

O gráfico de Pareto dos efeitos padronizados foi plotado, conforme Figura 40, e mostra quais variáveis foram determinadas como significativas na resposta da convexidade.

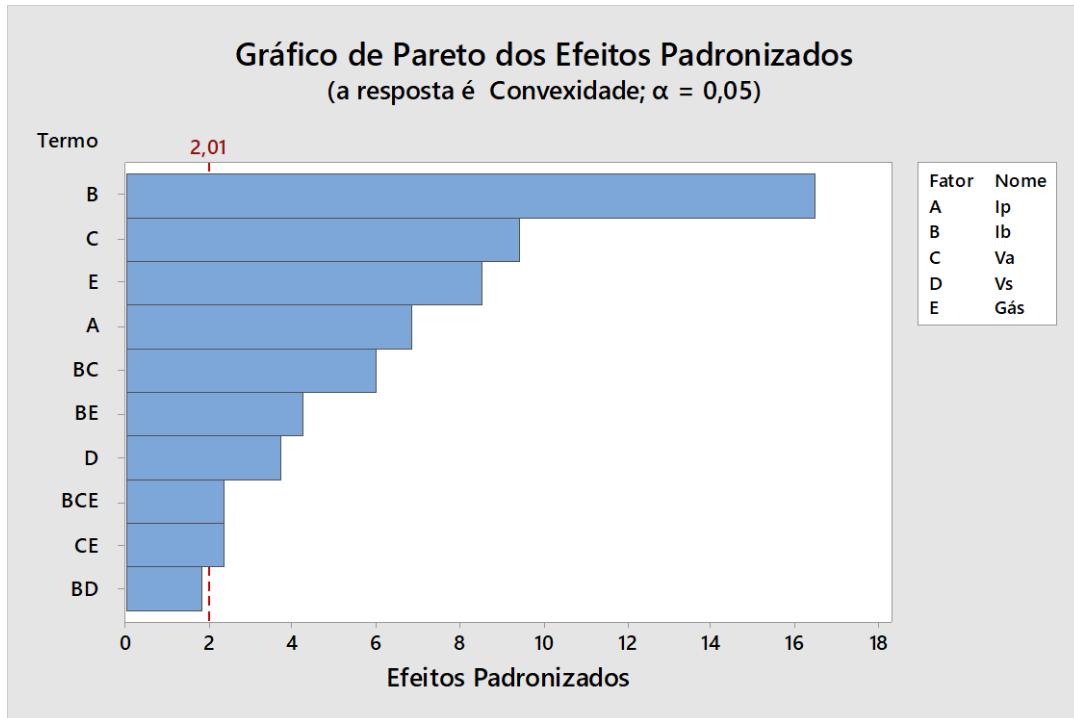


Figura 40- Gráfico de Pareto para a Convexidade

Pelo gráfico de Pareto é possível visualizar que todas as variáveis de entrada exercem influência no índice de convexidade do cordão de solda. A variável que mais afeta a resposta é a corrente de base (I_b), seguido da velocidade de alimentação (V_a), o tipo de gás de proteção utilizado, a corrente de pico (I_p) e a velocidade de soldagem (V_s). Além das variáveis principais, três interações duplas (de ordem 2) e uma interação tripla, isto é, de ordem 3, foram significativas no valor da convexidade do cordão, são elas: ($I_b * V_a$), ($I_b * Gás$), ($V_a * Gás$) e ($I_b * V_a * Gás$).

A relação entre as variáveis principais e a convexidade do cordão é expressa no gráfico de efeitos principais, ilustrado na Figura 41.

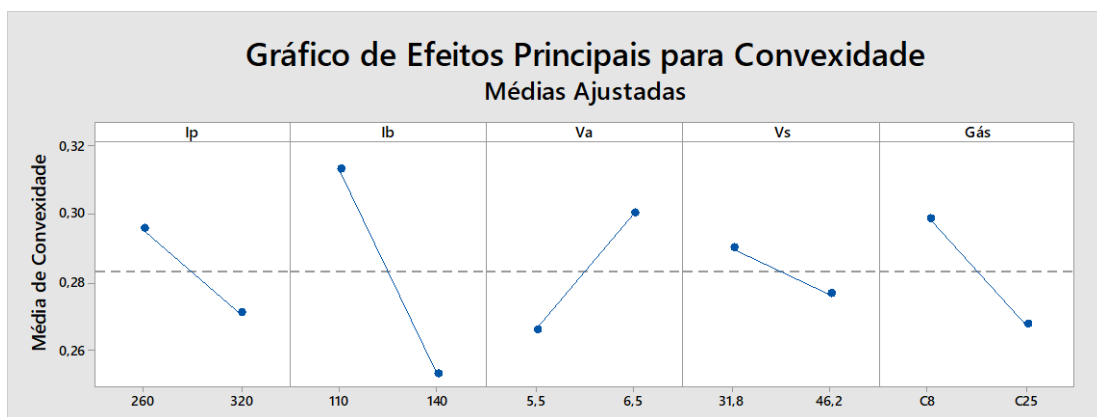


Figura 41- Gráfico de Efeitos Principais para a Convexidade

A análise dos efeitos das variáveis na convexidade demonstra o comportamento linear da resposta frente a variação direta da velocidade de alimentação e inversa dos demais parâmetros, ou seja, aumento de V_a resulta em aumento da convexidade, e aumento da corrente de pico (I_p), corrente de base (I_b), velocidade de soldagem (V_s) e concentração de CO_2 na mistura gasosa (Gás), implica em diminuição da convexidade do cordão de solda.

As interações obtidas no resultado da ANOVA para o valor de convexidade podem ser visualizadas na Figura 42.

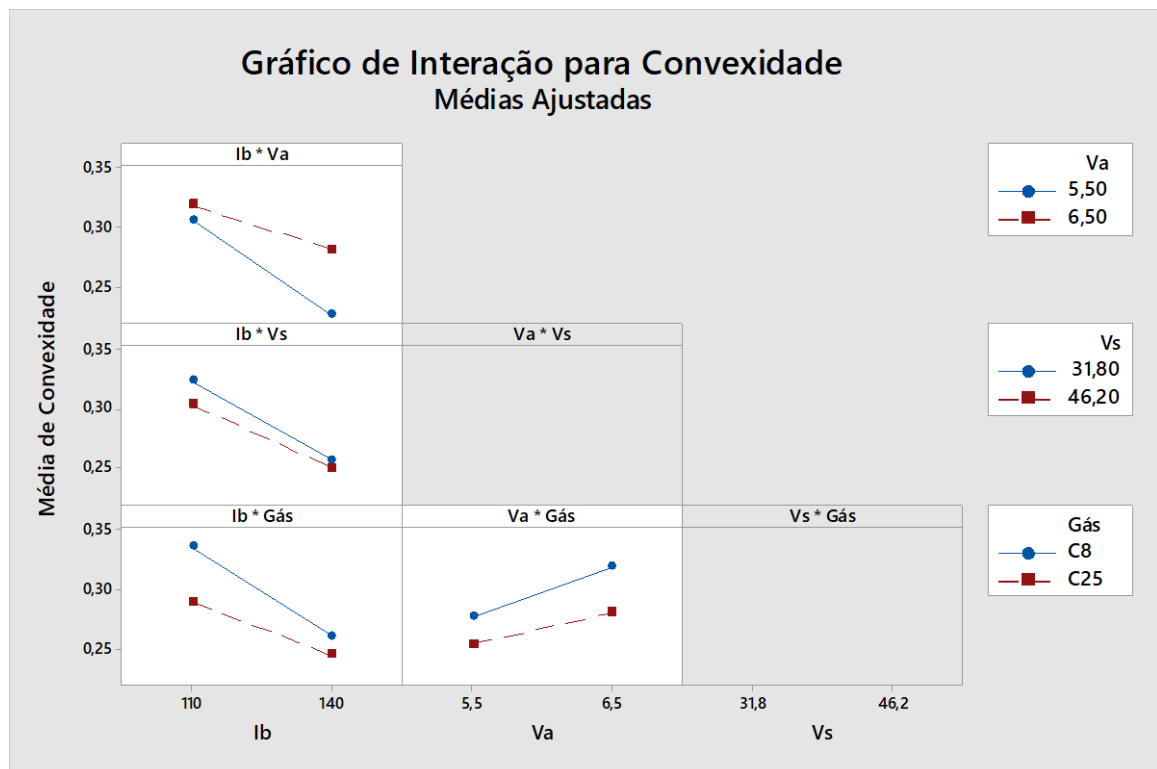


Figura 42- Gráfico de Interação para Convexidade

Conforme dito anteriormente, as interações que apresentaram significância foram ($I_b * V_a$), ($I_b * Gás$), e ($V_a * Gás$). Pela análise do gráfico de interações é possível entender melhor a relação desses parâmetros e a sua influência na convexidade. Em corrente de base baixa, a mudança na velocidade de alimentação não afeta muito no resultado da convexidade, e o uso de uma mistura gasosa com maior teor de CO_2 favorece uma maior molhabilidade ao cordão. Já em um nível maior de corrente de base, a velocidade de alimentação exerce maior influência, sendo que menor alimentação de arame é mais favorável para obtenção de menor índice de convexidade.

Em relação aos resíduos padronizados da análise da convexidade do cordão de solda, eles demonstram comportamento aleatório, independentes entre si e seguem uma distribuição normal ($P\text{-value} > 0,05$) conforme pode ser visto na Figura 43.

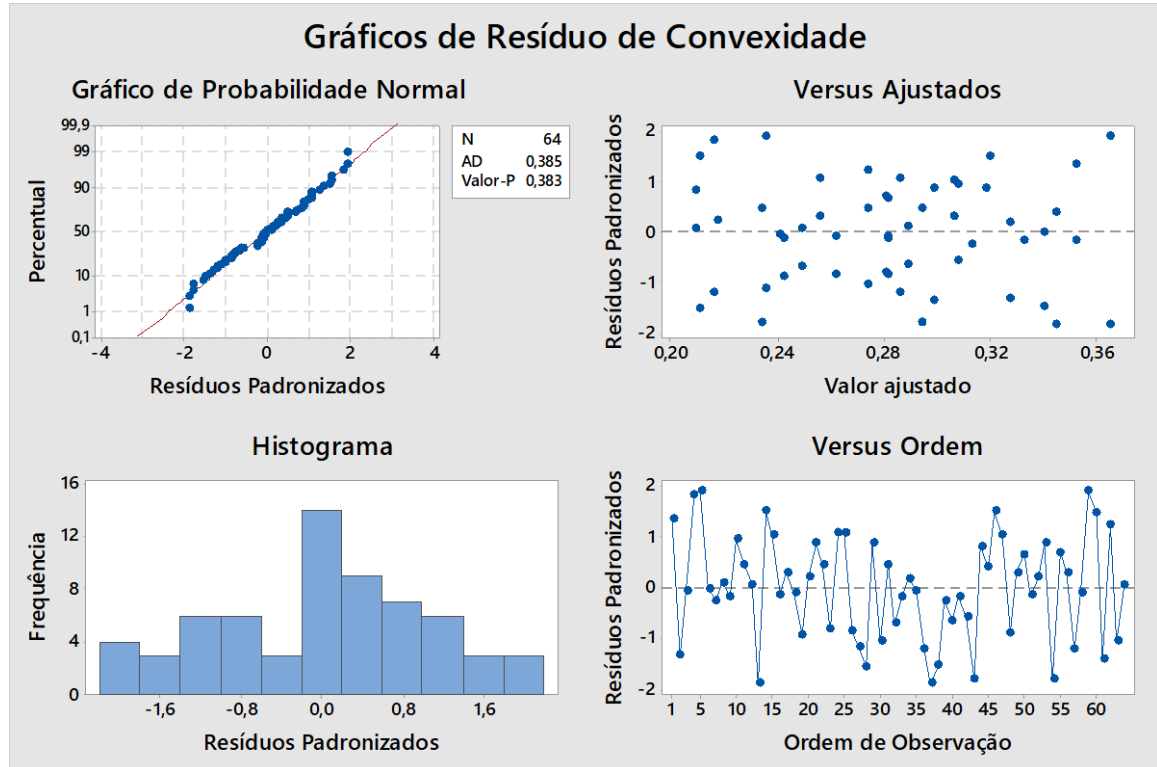


Figura 43- Gráfico de Resíduos para a Convexidade

4.3.5 Diluição

A diluição das soldas realizadas também foi medida. A diluição é uma característica importante no resultado da soldagem, pois a resistência mecânica da solda está associada a obtenção de um cordão com boa diluição. Segundo Marques; Modenesi; Bracarense (2017) a diluição ideal é aproximadamente 30%.

O resultado da análise de variância para a resposta da diluição está ilustrado na Tabela 16.

Tabela 16: Análise de Variância para Diluição

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	20	0,124244	0,006212	20,08	0,000
Linear	5	0,115258	0,023052	74,50	0,000
Ip	1	0,000977	0,000977	3,16	0,083
Ib	1	0,043577	0,043577	140,84	0,000

Va	1	0,000564	0,000564	1,82	0,184
Vs	1	0,007014	0,007014	22,67	0,000
Gás	1	0,063127	0,063127	204,02	0,000
Interações de 2 fatores	10	0,004253	0,000425	1,37	0,224
Ip*Ib	1	0,000452	0,000452	1,46	0,234
Ip*Va	1	0,000689	0,000689	2,23	0,143
Ip*Vs	1	0,000264	0,000264	0,85	0,361
Ip*Gás	1	0,000352	0,000352	1,14	0,292
Ib*Va	1	0,001139	0,001139	3,68	0,062
Ib*Vs	1	0,000077	0,000077	0,25	0,621
Ib*Gás	1	0,000002	0,000002	0,01	0,944
Va*Vs	1	0,000039	0,000039	0,13	0,724
Va*Gás	1	0,000264	0,000264	0,85	0,361
Vs*Gás	1	0,000977	0,000977	3,16	0,083
Interações de 3 fatores	5	0,004733	0,000947	3,06	0,019
Ip*Ib*Va	1	0,000189	0,000189	0,61	0,439
Ip*Va*Vs	1	0,002889	0,002889	9,34	0,004
Ip*Va*Gás	1	0,000564	0,000564	1,82	0,184
Ip*Vs*Gás	1	0,000827	0,000827	2,67	0,109
Ib*Vs*Gás	1	0,000264	0,000264	0,85	0,361
Erro	43	0,013305	0,000309		
Falta de ajuste	11	0,002155	0,000196	0,56	0,844
Erro Puro	32	0,011150	0,000348		
Total	63	0,137548			

O resultado obtido também obteve um bom ajuste, conforme Tabela 17.

Tabela 17: Ajustes da resposta de Diluição

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,0175901	90,33%	85,83%	78,57%

O valor de R² ajustado ficou acima de 80%, apresentando um bom nível de ajuste das respostas obtidas. O que significa dizer que o modelo encontrado para descrever a diluição, conforme equação (8), a seguir, foi bem ajustado e possui confiabilidade.

$$\begin{aligned}
 \text{Diluição} = & -6,21 + 0,02062 \text{ Ip} + 0,0163 \text{ Ib} + 1,100 \text{ Va} + 0,1044 \text{ Vs} - 0,054 \text{ Gás} - 0,000040 \text{ Ip*Ib} \\
 & - 0,00360 \text{ Ip*Va} - 0,000364 \text{ Ip*Vs} + 0,000617 \text{ Ip*Gás} - 0,00278 \text{ Ib*Va} \\
 & + 0,000010 \text{ Ib*Vs} - 0,000723 \text{ Ib*Gás} - 0,01782 \text{ Va*Vs} + 0,0533 \text{ Va*Gás} \\
 & - 0,00663 \text{ Vs*Gás} + 0,000008 \text{ Ip*Ib*Va} + 0,000062 \text{ Ip*Va*Vs} - 0,000198 \text{ Ip*Va*Gás} \\
 & + 0,000017 \text{ Ip*Vs*Gás} + 0,000019 \text{ Ib*Vs*Gás}
 \end{aligned} \tag{8}$$

As variáveis que afetam a diluição da solda puderam ser determinadas pelo gráfico de Pareto, conforme ilustra a Figura 44.

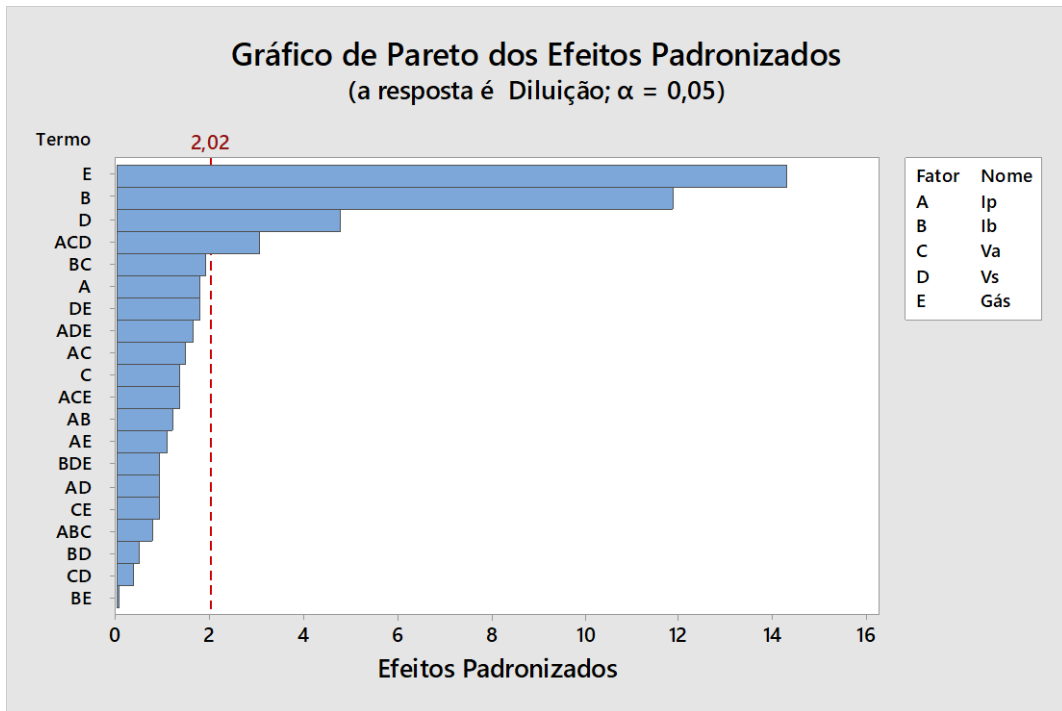


Figura 44- Gráfico de Pareto para a Diluição

O gráfico indica que três variáveis principais são significativas na resposta: o tipo de gás, a corrente de base (I_b) e a velocidade de soldagem (V_s). Além destas, a interação tripla entre corrente de pico, velocidade de alimentação do arame e velocidade de deslocamento da tocha ($I_p * V_a * V_s$) mostrou-se ser significativa na diluição.

Para ilustrar a influência desses parâmetros na diluição da solda, o gráfico de efeitos principais, apresentado na Figura 45, foi plotado e fornece uma boa ideia de como a mudança nas variáveis de entrada afeta a resposta de interesse.

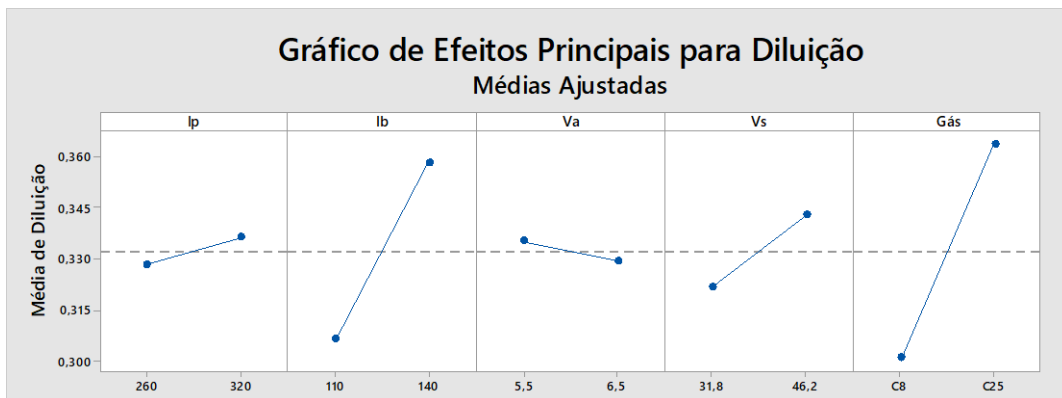


Figura 45- Gráfico de Efeitos Principais para a resposta de Diluição

Pelo gráfico apresentado é possível verificar como o gás de proteção utilizado afeta na diluição da solda – quanto maior o percentual de dióxido de carbono na mistura, maior será a diluição atingida na solda. Essa relação direta entre o gás e o resultado de diluição também ocorre com os parâmetros I_b e V_s , porém em menor intensidade. Os parâmetros I_p e V_a não exercem grande influência na diluição, entretanto, por estarem presentes na interação tripla, são variáveis que devem ser consideradas no modelo ajustado para a resposta em questão.

Os resíduos também foram analisados e demonstraram comportamento satisfatório, o que implica dizer que o modelo está realmente bem ajustado. Os gráficos para o resíduo da diluição podem ser vistos na Figura 46.

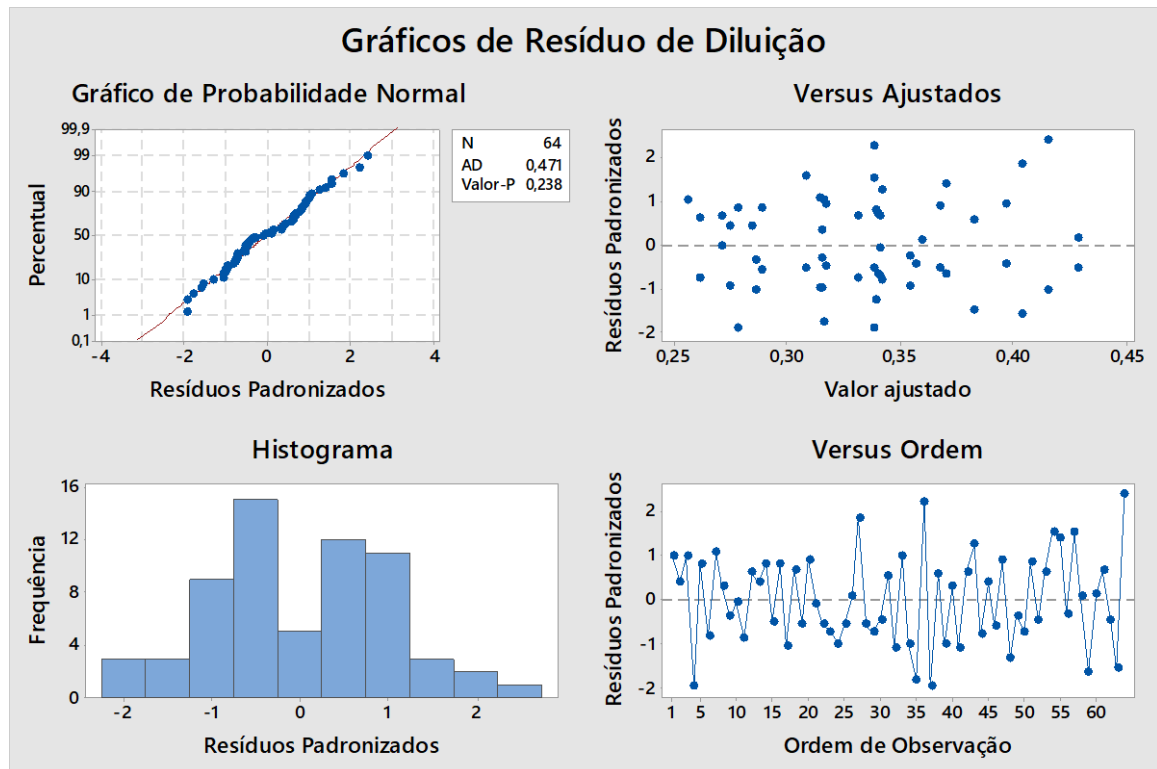


Figura 46- Gráfico para Resíduos de Diluição

Pela análise estatística dos parâmetros do processo, apresentada anteriormente, é possível verificar quão importante é o conhecimento sobre as variáveis e seus efeitos na geometria do cordão de solda. Nota-se que o gás de proteção exerce influência sobre todas as respostas estudadas, pois em todas elas, em menor ou maior grau, a mistura gasosa foi um fator significativo.

4.4 Juntas Soldadas em Chanfro – STT[®] x GMAW

A partir das análises anteriores, dos cordões feitos em BOP, a configuração de parâmetros que apresentou maior resposta de penetração e largura foi tomada como referência para comparação entre os processos STT[®] e GMAW Convencional, desta vez com soldas feitas em juntas chanfradas.

A melhor condição das soldas BOP ocorreu para os maiores níveis de Corrente de Pico e Corrente de Base ($I_p = 320\text{A}$; $I_b = 140\text{A}$), maior nível de velocidade de alimentação ($V_a = 6,5$ m/min), associados ao gás C25 e uma baixa velocidade de soldagem ($V_s = 31,8$ cm/min).

A comparação focou em analisar as respostas geométricas de Penetração em face e Largura de ZTA, e as propriedades mecânicas de Resistência à tração e Microdureza.

4.4.1 Penetração em face

A Penetração em face foi medida perpendicular à parede do chanfro, em vários pontos do cordão. Os resultados foram utilizados na condução de um teste de hipótese para verificar se havia diferença estatisticamente significativa entre soldas realizadas no processo Convencional e no processo por curto-circuito controlado STT[®].

Conforme o gráfico de intervalo (Figura 47) e o *p-value* do teste ANOVA acima de 0,05 (Tabela 18), não é possível concluir que exista diferença significativa na penetração em face, quando se utiliza gás C8, para os processos de soldagem GMAW Convencional e STT[®].

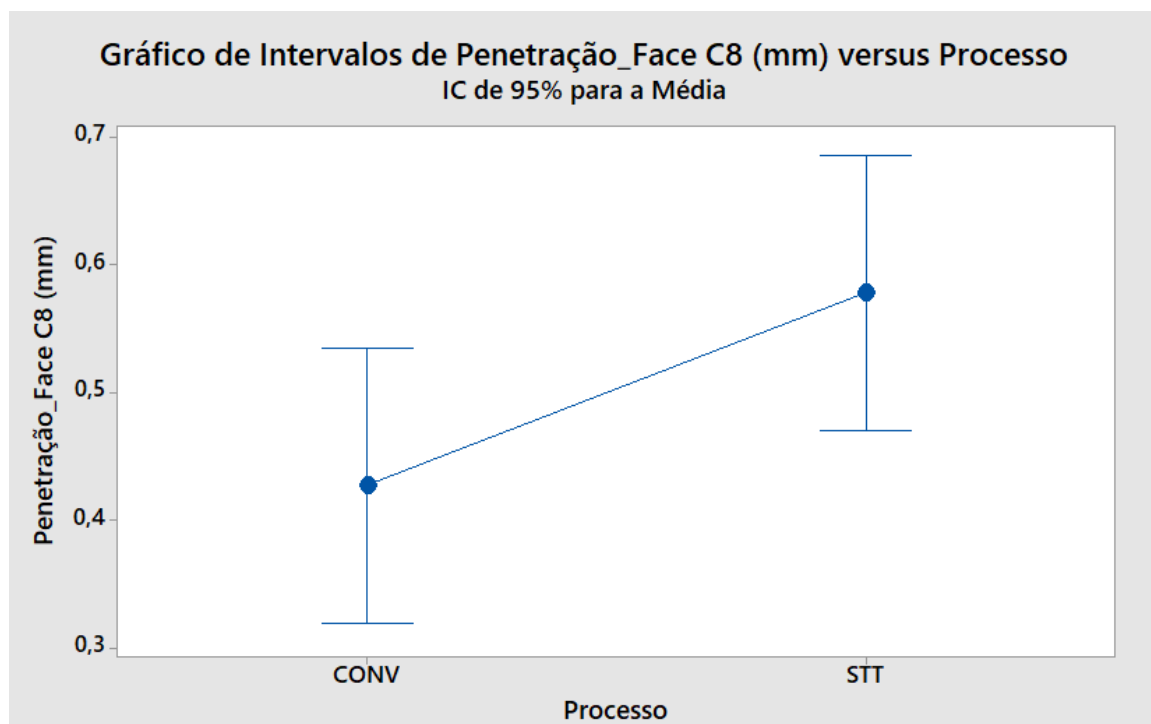


Figura 47- Gráfico de Intervalos do Teste ANOVA para Penetração em face utilizando gás C8

Tabela 18- Teste ANOVA para Penetração em face utilizando gás C8

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Processo	1	0,1253	0,12525	4,26	0,052
Erro	20	0,5879	0,02940		
Total	21	0,7132			

Observa-se o mesmo comportamento para o uso do gás de proteção C25. A Figura 48 indica o gráfico de intervalos, é possível verificar que os intervalos coincidem, o que indica que as respostas de Penetração sejam similares para ambos os processos.

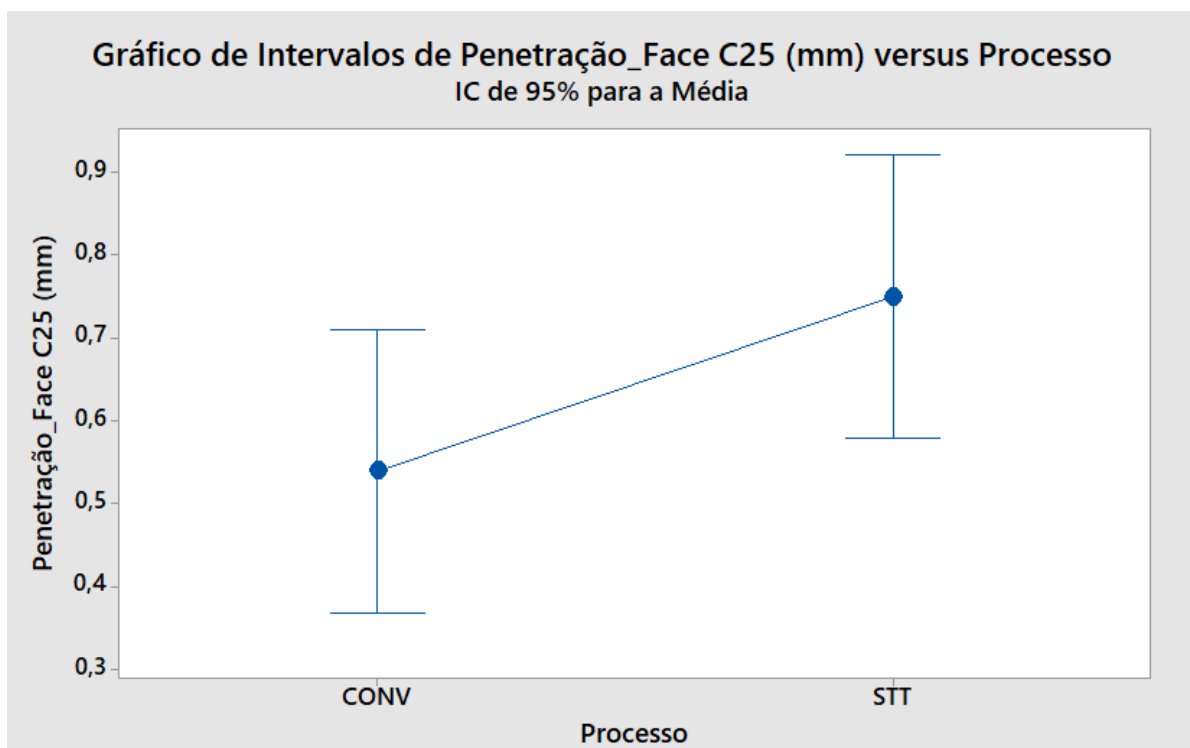


Figura 48- Gráfico de Intervalos do Teste ANOVA para Penetração em face utilizando gás C25

O *p-value* do teste estatístico acima de 5% confirma a similaridade das respostas alcançadas pelos dois processos. A tabela 19 apresenta o resultado do teste ANOVA.

Tabela 19- Teste ANOVA para Penetração em face utilizando gás C25

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Processo	1	0,2425	0,24255	3,29	0,085
Erro	20	1,4740	0,07370		
Total	21	1,7165			

Os mesmos testes foram realizados para averiguar se a mudança do gás de proteção, de C8 para C25 gera uma penetração diferente. Verificou-se que, tanto no processo STT[®] como no GMAW, os gases de proteção em estudo resultaram em respostas semelhantes. As Figuras 49 e 50 apresentam o resultado gráfico dos testes para ambos os processos.

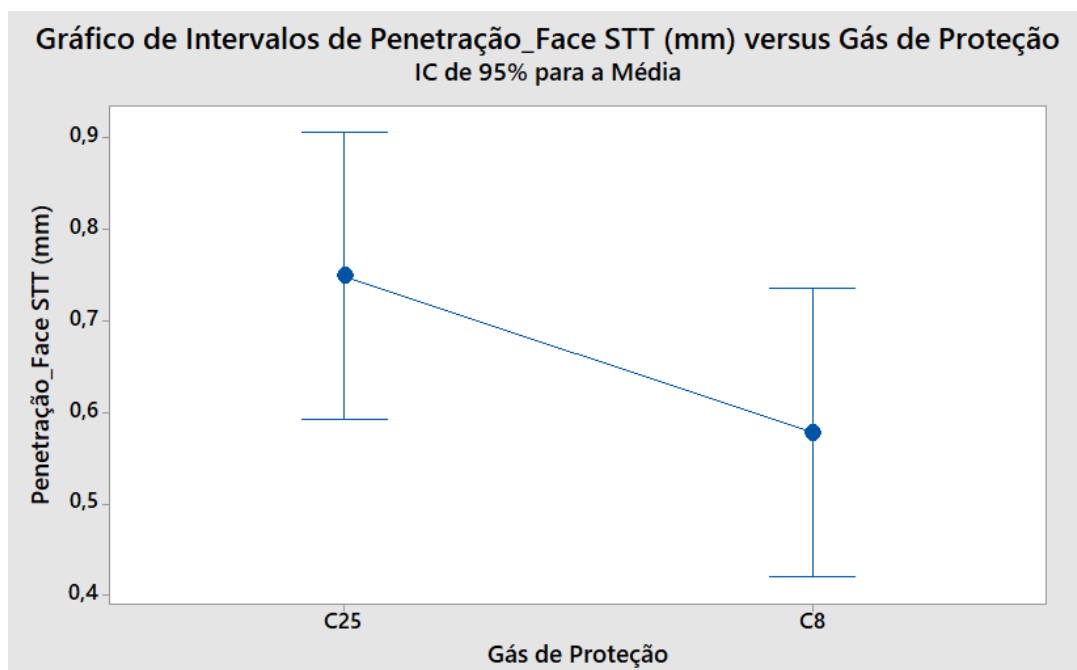


Figura 49- Gráfico de Intervalos do Teste ANOVA para Penetração em face utilizando Processo STT

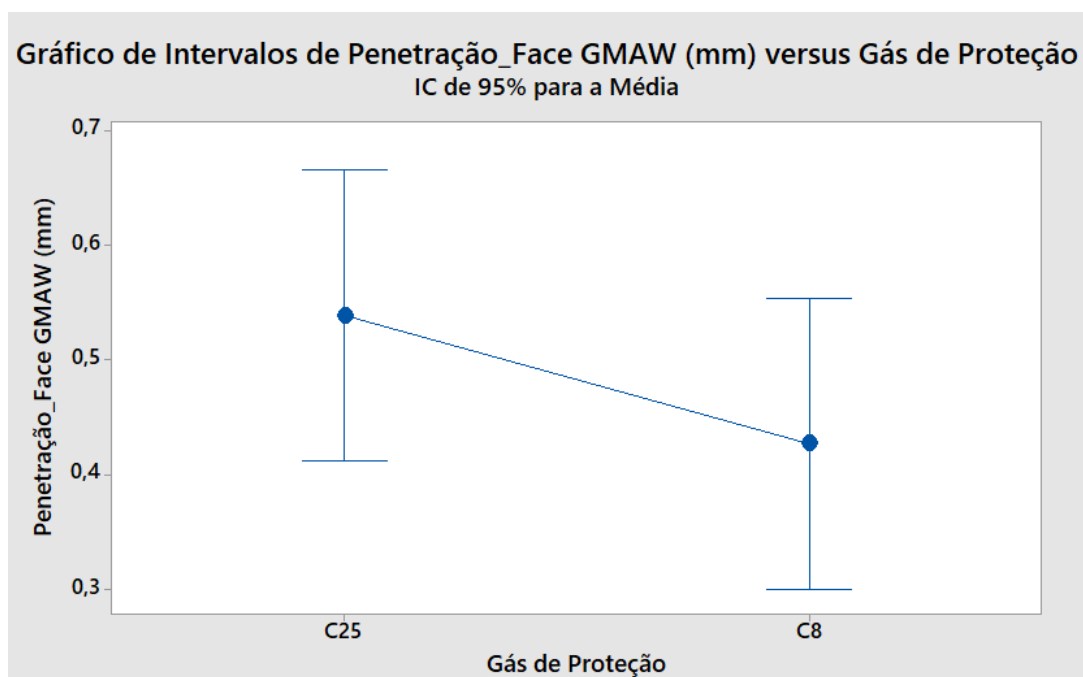


Figura 50- Gráfico de Intervalos do Teste ANOVA para Penetração em face utilizando Processo GMAW

Os *p-values* dos testes estatísticos para análise da influência do gás, apresentados nas Tabelas 20 e 21, confirmam o que foi observado pela análise gráfica; não há diferença estatística entre as respostas, ou seja, a mudança do gás de proteção não impacta o resultado da penetração.

Tabela 20- Teste ANOVA para Penetração em face utilizando Processo STT

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Gás de Proteção	1	0,1607	0,16065	2,58	0,124
Erro	20	1,2445	0,06223		
Total	21	1,4052			

Tabela 21- Teste ANOVA para Penetração em face utilizando Processo GMAW Convencional

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Gás de Proteção	1	0,06877	0,06877	1,68	0,209
Erro	20	0,81741	0,04087		
Total	21	0,88618			

Apesar de o resultado sugerir uma conclusão estatística de diferença não significativa entre os processos, é importante ressaltar que esta é uma informação válida para os processos ajustados na configuração de parâmetros utilizada.

Outras configurações, por exemplo em níveis mais baixos de energia ou na utilização de um material de pior soldabilidade, podem exprimir diferença significativa entre o processo GMAW convencional e o controlado, afinal as respostas em soldagem dependem de diversos fatores, o que caracteriza um Processo Multivariado. Portanto, para outros níveis de ajustes das variáveis estudadas faz-se necessário avaliar o comportamento dos processos na resposta de Penetração em face.

4.4.2 Largura da ZTA

As medições de Largura de ZTA também foram feitas perpendicularmente à parede do chanfro. Os resultados do teste de hipótese revelam que o processo STT[®] resulta em menor largura de ZTA que o processo GMAW Convencional, comportamento que se observa para ambos os gases de proteção.

Os gráficos de intervalos para Largura de ZTA (Figuras 51 e 52) e o valor do *p-value* (Tabelas 22 e 23) indicam que os processos produzem largura de ZTA diferentes, tanto para o uso do gás C8 como uso do C25.

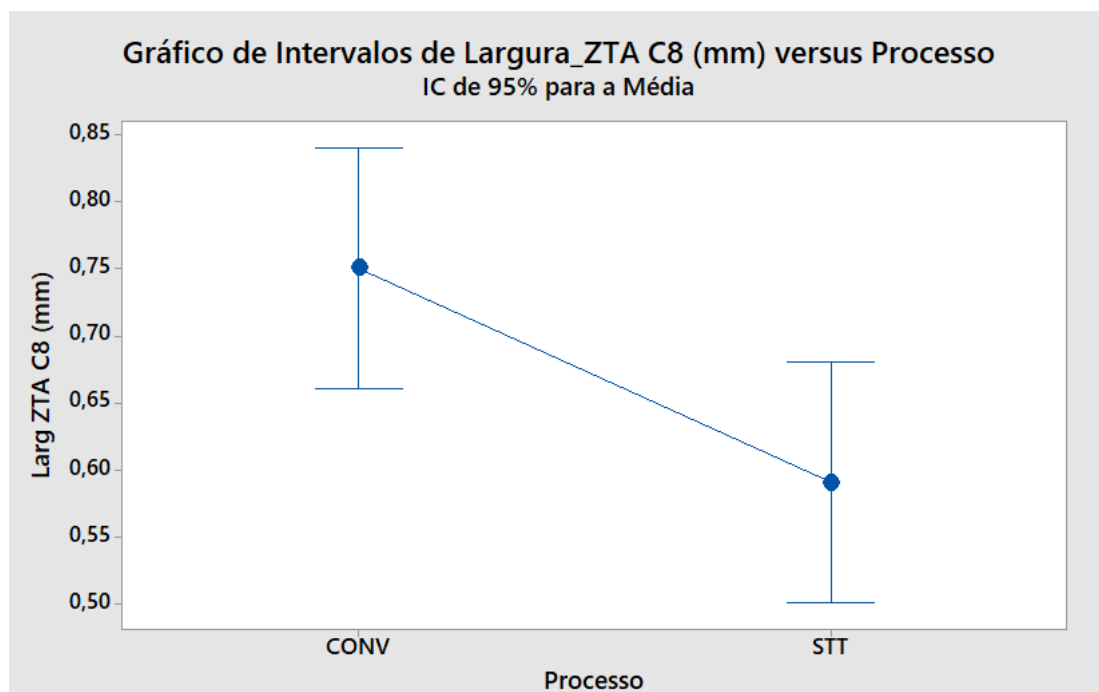


Figura 51- Gráfico de Intervalos do Teste ANOVA para Largura da ZTA utilizando gás C8

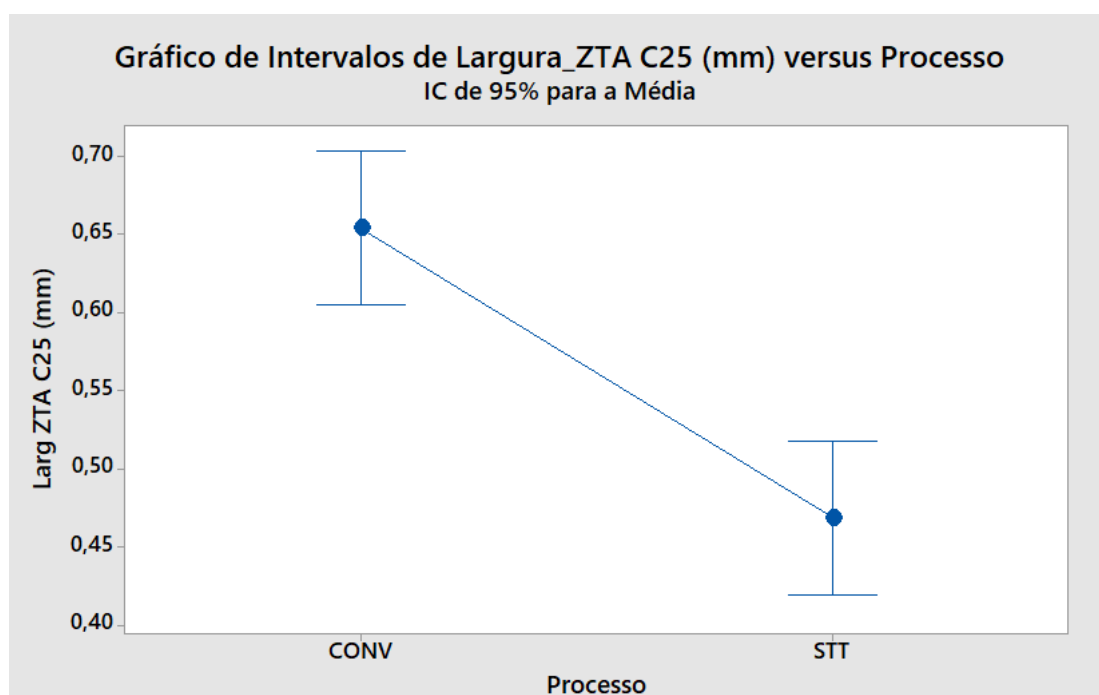


Figura 52- Gráfico de Intervalos do Teste ANOVA para Largura da ZTA utilizando gás C25

Tabela 22- Teste ANOVA para Largura da ZTA utilizando gás C8

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Processo	1	0,1528	0,15280	6,85	0,016
Erro	22	0,4910	0,02232		
Total	23	0,6438			

Tabela 23- Teste ANOVA para Largura da ZTA utilizando gás C25

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Processo	1	0,2054	0,205350	30,78	0,000
Erro	22	0,1468	0,006671		
Total	23	0,3521			

Para determinar o sentido dessa diferença realizou-se um teste T para duas amostras, onde a hipótese nula é a hipótese da igualdade, e a hipótese alternativa formulada é de que a Largura da ZTA produzida pelo processo STT® (μ_2) é menor que a largura da ZTA produzida pelo processo GMAW Convencional (μ_1).

Os resultados do teste utilizando gás de proteção C8 e C25 são apresentados nas Tabelas 24 e 25, respectivamente. Com base nos resultados pode-se rejeitar a hipótese nula (de igualdade) e assumir a hipótese alternativa como verdadeira, o que implica concluir que, para qualquer um dos dois gases, o processo STT® produz soldas com menor Largura de ZTA que o processo GMAW.

Tabela 24- Teste T para duas Amostras – Largura ZTA utilizando C8

Hipótese nula		$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$
Hipótese alternativa		$H_1: \mu_1 - \mu_2 > 0$
Valor-T	GL	Valor-p
2,62	22	0,008

Tabela 25- Teste T para duas Amostras – Largura ZTA utilizando C25

Hipótese nula		$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$
Hipótese alternativa		$H_1: \mu_1 - \mu_2 > 0$
Valor-T	GL	Valor-p
5,55	22	0,000

Todos esses testes foram realizados também para comparação dos gases de proteção C8 e C25. Os resultados alcançados sugerem que somente no processo STT® a mudança de um gás para outro exprime uma diferença significativa na Largura da ZTA, enquanto no GMAW a resposta não se altera. Isto pode ser visto pelos gráficos de Intervalos (Figuras 53 e 54).

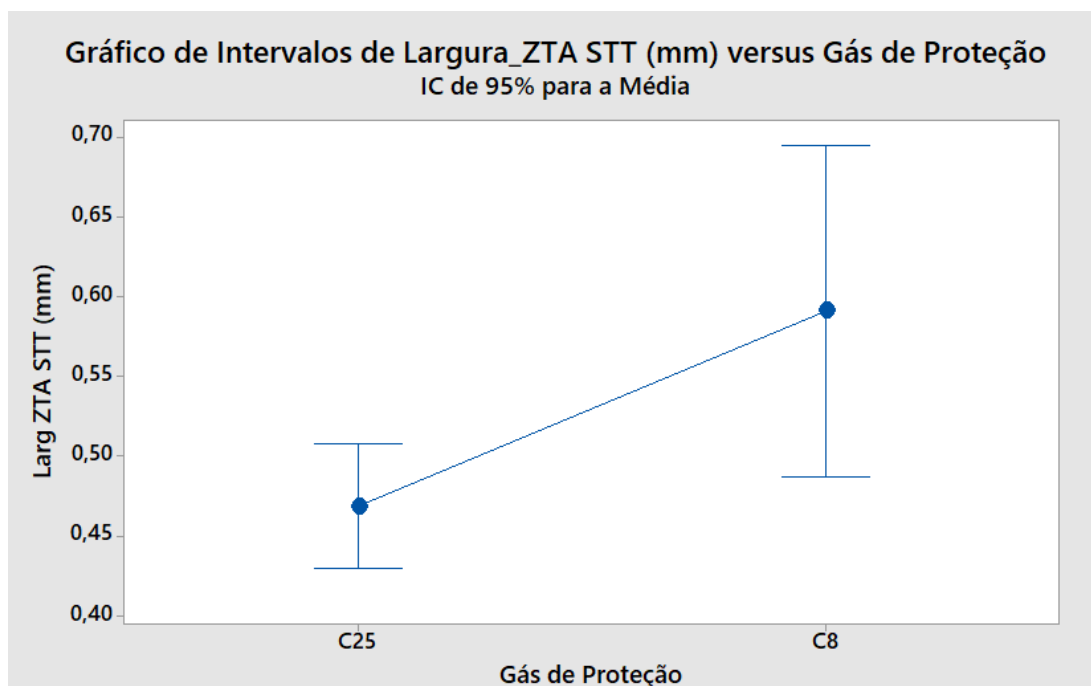


Figura 53- Gráfico de Intervalos do Teste ANOVA para Largura da ZTA utilizando processo STT

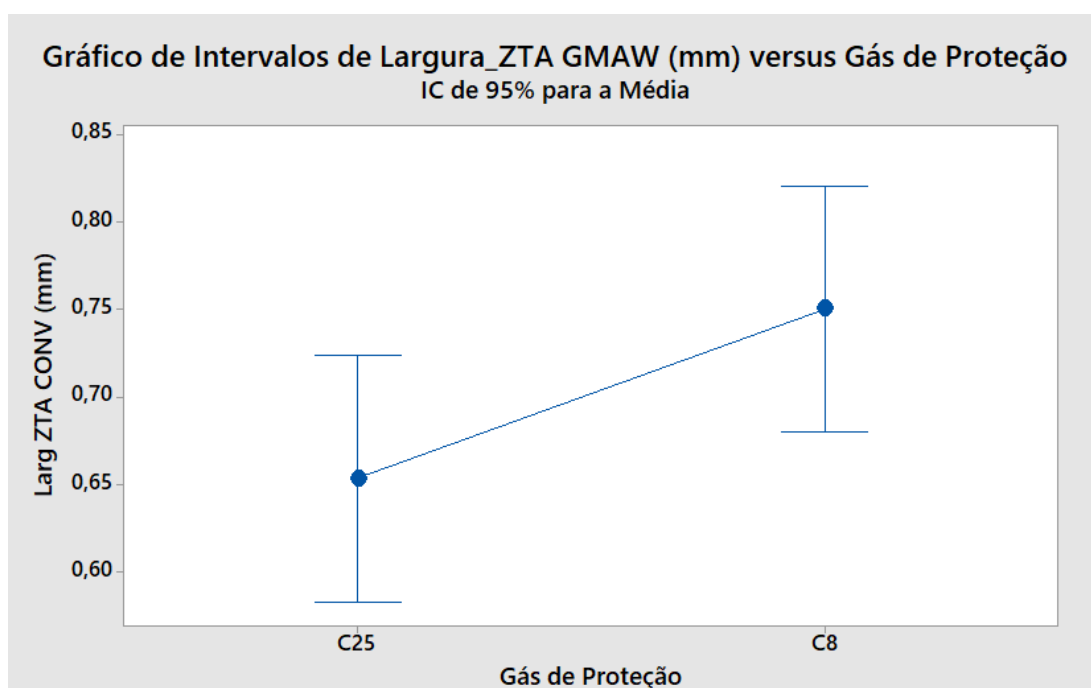


Figura 54- Gráfico de Intervalos do Teste ANOVA para Largura da ZTA utilizando processo GMAW

As Figuras 53 e 54 fornecem uma ideia visual da influência dos gases em cada um dos processos. Essa influência é comprovada pelo *p-value* dos testes estatísticos (Tabelas 26 e 27).

Tabela 26- Teste de Welch para Largura da ZTA utilizando processo STT

Fonte	Num		Valor F	Valor-P
	GL	Den GL		
Gás de Proteção	1	14,0160	5,88	0,029

Tabela 27- Teste ANOVA para Largura da ZTA utilizando processo GMAW

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Processo	1	0,05607	0,05607	4,07	0,056
Erro	22	0,30298	0,01377		
Total	23	0,35905			

Para determinar qual é a diferença que os gases produzem na Largura da ZTA, quando se utiliza o processo STT[®], foi executado um teste T para duas amostras, onde a hipótese nula é a hipótese da igualdade e a hipótese alternativa é a de que a Largura da ZTA alcançada com gás de proteção C25 (μ_1) é menor que a largura da ZTA alcançada utilizando gás C8 (μ_2).

Pelo resultado do teste (Tabela 28) pode-se assumir a hipótese alternativa como verdadeira, o que implica concluir que utilizar gás C25 permite a obtenção de cordões de solda com menor largura de ZTA em comparação ao uso do C8.

Tabela 28- Teste T para duas Amostras – Largura ZTA utilizando processo STT

Hipótese nula	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$	
Hipótese alternativa	$H_1: \mu_1 - \mu_2 < 0$	
Valor-T	GL	Valor-p
-2,42	14	0,015

Os resultados alcançados para largura de ZTA nas soldas feitas pelo processo STT[®] denotam e reforçam o que é encontrado na literatura sobre as vantagens desse processo de soldagem em relação aos processos convencionais.

4.4.3 Propriedades Mecânicas

Com o objetivo de validar os resultados encontrados, as soldas feitas em processo STT[®] e em Convencional, na condição utilizada para junta em chanfro, foram submetidas ao ensaio de tração, para avaliar a resistência dos cordões, e ao ensaio de microdureza da ZTA.

Os resultados dos testes de tração realizados são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 - Resistência Média a Tração dos Corpos de Prova Soldados

Corpo de Prova	Limite de Resistência a Tração (MPa)
Metal Base	526
STT [®] C8	483
CONV C8	434
STT [®] C25	476
CONV C25	488

Os CPs soldados com gás C8 no processo STT[®] apresentaram maior Resistência a Tração, cerca de 11% maior que o processo Convencional, enquanto para o C25 melhores resultados foram encontrados para o GMAW, que apresentou uma resistência 2,5% maior. Comparado ao metal base, o STT[®] apresentou uma resistência de 90 a 92%, enquanto para os corpos de prova soldados com GMAW alcançou-se uma resistência de 82% do material metal de base para o gás C8 e os mesmos 92% vistos no processo STT[®] para o gás C25.

Para análise de Microdureza da ZTA os dados coletados foram lançados no software estatístico para condução do teste de hipótese. O resultado encontrado demonstra que não há diferença dita significativa de microdureza se utilizado processo de soldagem convencional ou controlado. Isso pode ser verificado pelo gráfico de intervalos para Microdureza da ZTA, apresentado na Figura 55.

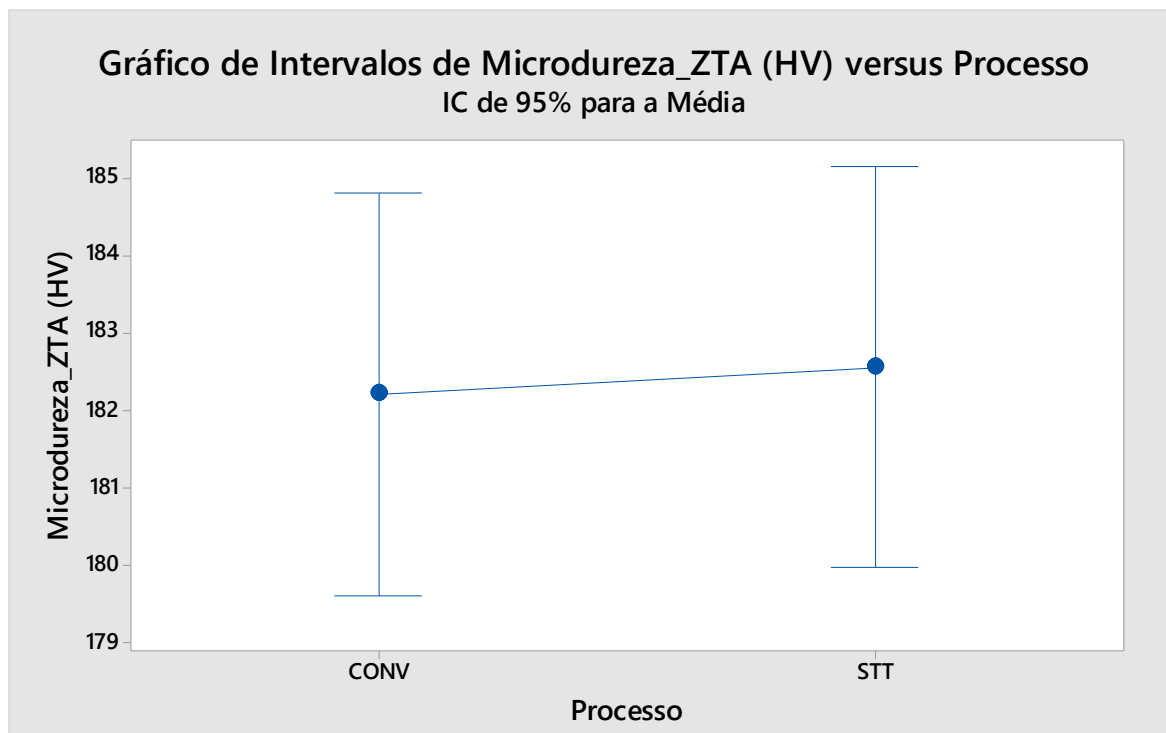


Figura 55 - Gráfico de Intervalos do Teste ANOVA para Microdureza da ZTA

O teste do p -value da Análise de Variância (Tabela 30) confirma que não há diferença estatística entre os processos para o resultado de Microdureza da região da ZTA.

Tabela 30- Análise de Variância para Microdureza da ZTA

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Processo	1	2,54	2,538	0,04	0,851
Erro	82	5857,81	71,437		
Total	83	5860,35			

Assim como a Largura da ZTA, a microdureza também é dependente do material que está sendo soldado. No caso do aço ASTM A-36, por apresentar uma ótima soldabilidade, entende-se que a mudança de processo não acarretaria uma alteração significativa de resposta, uma vez que o material não apresenta dificuldades ou problemas relacionados a dureza em processo de soldagem.

Embora sem significância estatística que corrobore para conclusão de diferenças importantes em relação ao processo e ao gás de proteção, pelo gráfico de interações pode-se verificar um comportamento mais robusto do STT®, uma vez que a média das respostas ficaram mais próximas em comparação com a média das respostas para o processo GMAW Convencional.

O gráfico de interações para a Microdureza da ZTA é apresentado na Figura 56.

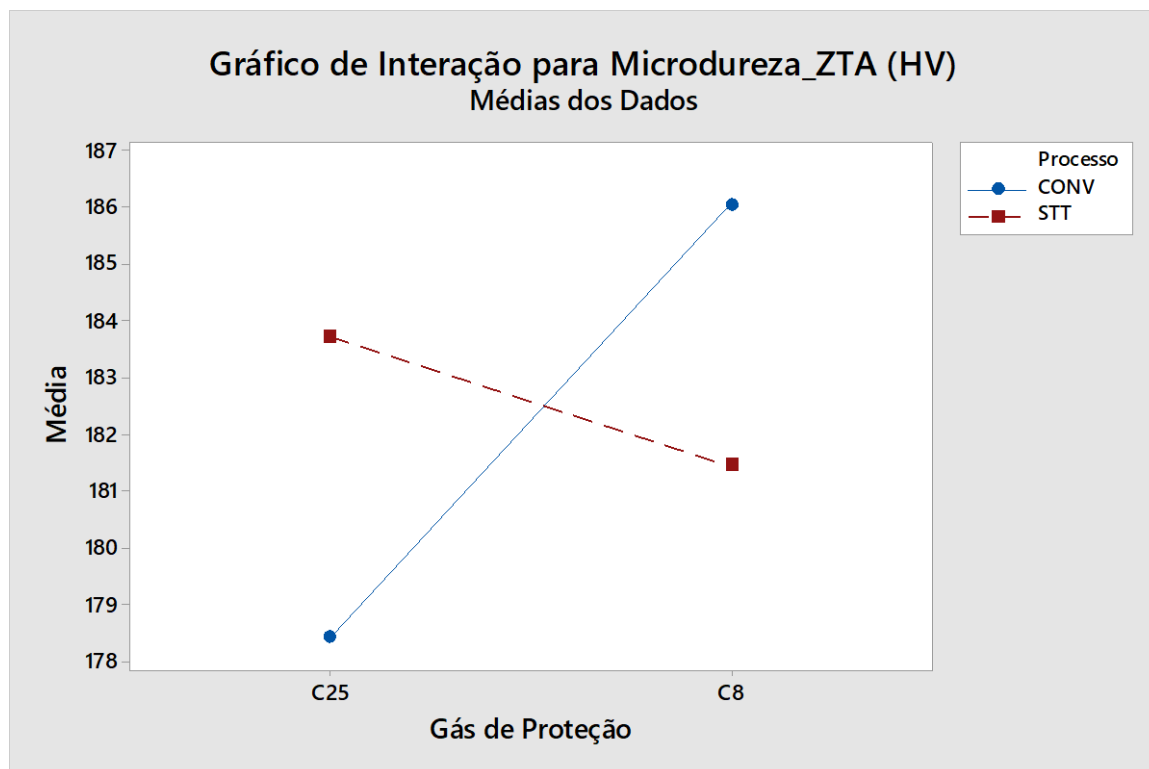


Figura 56- Gráfico de Interação para a Microdureza da ZTA

É importante avaliar a Microdureza da ZTA não somente em comparação ao processo de soldagem empregado, que como vimos apresentam o mesmo resultado, mas sobretudo em relação à dureza do metal de base. Para avaliar o comportamento da dureza em relação ao metal base foi plotado um gráfico com os valores de Microdureza que demonstram o perfil dessa resposta para os processos em estudo, desde o metal base até o metal de solda, passando pela ZTA. A Figura 57 ilustra os valores médios de Microdureza em cada uma das regiões do cordão de solda.

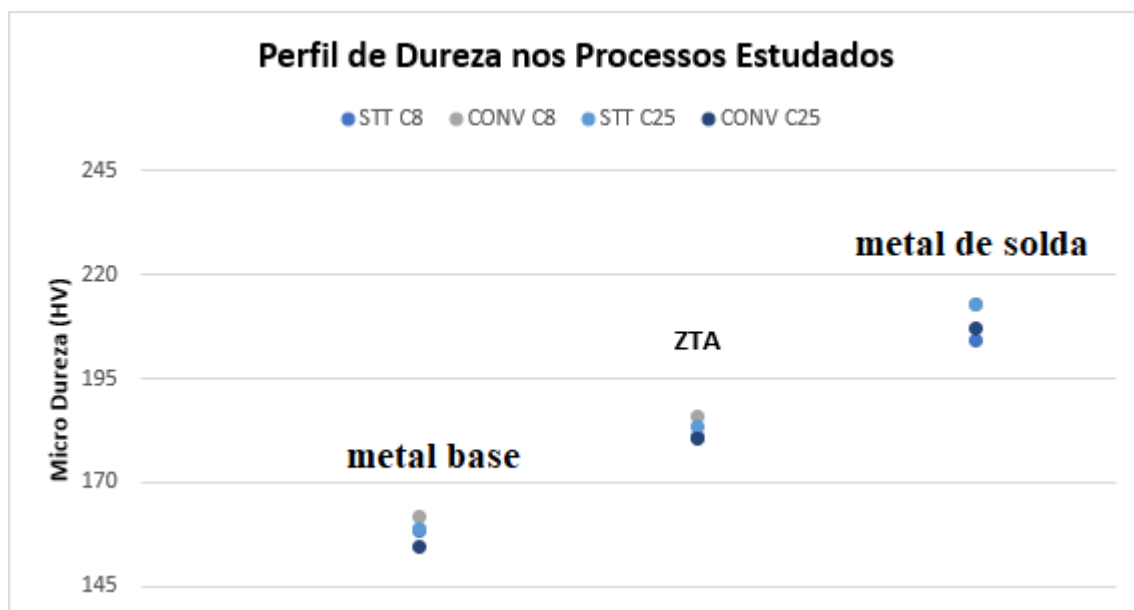


Figura 57- Perfil de Dureza nos Processos Estudados

Nota-se que em cada uma das regiões do cordão de solda (MB, ZTA e MA), os valores de Dureza estão muito próximos, portanto, o perfil de Dureza não difere de acordo com o Processo ou o Gás de Proteção utilizados, o que indica que independente da configuração em que o cordão for realizado o resultado será o mesmo.

Em relação ao perfil de dureza observa-se que, alinhado ao que é citado por Moreira (2008), os níveis de dureza aumentaram desde o metal de base até o metal de solda, tanto no processo convencional como também no STT[®].

Na contramão do que afirma Suban & Tušek (2001), de que com o aumento da adição de CO₂ ocorre um aumento da dureza do cordão, no presente estudo o efeito observado foi o inverso – uma diminuição, embora não significativa, da dureza do cordão no processo GMAW, que confirma o que relata Ebrahimnia *et al* (2009). Já para a soldagem utilizando o controle de curto-circuito, observa-se que o aumento do teor de gás carbônico produz sim um aumento da dureza do cordão.

Pelos resultados obtidos de propriedades mecânicas, avalia-se que o comportamento do processo STT[®] não difere muito do convencional, entretanto é importante ressaltar que depende muito da aplicação e dos demais fatores envolvidos no processo.

5 CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho era realizar estudo da variação dos gases de proteção utilizando os processos de soldagem GMAW convencional e GMAW-STT[®] em aço estrutural ASTM A-36. Anterior à análise de variação dos gases em si, ao realizar estudo dos parâmetros no processo por curto-circuito controlado foi possível encontrar uma configuração interessante para solda do material em estudo e obter um melhor entendimento do processo.

Por meio dos dados coletados e análises realizadas nas soldas BOP, é possível verificar a grande interdependência das variáveis de entrada no processo GMAW-STT[®], uma vez que várias interações duplas se mostraram significativas nas respostas geométricas. Nesse sentido é importante salientar o efeito expressivo apresentado pelo gás de proteção, que demonstrou ser a variável mais importante para a Penetração e a Diluição do cordão de solda. Além disso, esteve entre as principais variáveis de processo para outras características geométricas, como a altura do reforço, a largura do cordão e o índice de convexidade.

Os parâmetros Corrente de base e pico do processo STT[®] configuraram grande impacto na geometria do cordão de solda. Dentre eles, a corrente de base demonstrou maior efeito que a corrente de pico. A geometria do cordão de solda sobre chapa, entretanto, foi mais fortemente influenciada por parâmetros comuns aos processos convencionais, como a velocidade de soldagem e a velocidade de alimentação, que estiveram presentes em todas as respostas observadas neste estudo.

Isso está de acordo com a literatura sobre processos de soldagem a arco elétrico e STT[®], de modo geral, e reforça como é necessário ter um bom entendimento desses processos, para que, em cada aplicação, possa ser extraído o melhor resultado.

Os testes de hipótese realizados para comparar a geometria do cordão de solda gerado nos processos GMAW e STT[®] demonstram que a Largura da ZTA depende de qual processo é utilizado, enquanto a Penetração em Face foi a mesma nos dois processos. O processo por curto-circuito controlado resulta em soldas com ZTA menor, o que caracteriza uma vantagem importante desse processo em comparação aos processos convencionais.

Outra conclusão que se pode fazer, baseado nos resultados obtidos neste estudo, é a respeito da influência que o gás de proteção exerce sobre a Largura da ZTA, e que difere de um processo para o outro. Enquanto no processo GMAW a mudança no tipo de gás não alterou em nada o tamanho da ZTA, no processo STT[®] o gás C25 gerou melhores resultados.

Por fim, os resultados de resistência mecânica e microdureza da ZTA demonstraram soldas de qualidade obtidas para ambos os processos, e isso se deve ao material utilizado na pesquisa apresentar ótima soldabilidade, aliado à busca por uma combinação adequada de parâmetros, com destaque para a importância da utilização de técnicas e softwares estatísticos que corroboram para maior agilidade e assertividade na busca de soluções ótimas para variáveis de processo.

6 REFERÊNCIAS

ADI, P.; ISMAR, H.; PETAR, T. Advantages of MAG-STT Welding Process for Root Pass Welding in the Oil and Gas Industry. **Tem Journal**, v. 5, n. 1, p. 76–79, 2016.

ALLUM, C. J. Metal transfer in arc welding as a varicose instability. I. Varicose instabilities in a current-carrying liquid cylinder with surface charge. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 18, n. 7, p. 1431–1446, 1985a.

ALLUM, C. J. Metal transfer in arc welding as a varicose instability. II. Development of model for arc welding. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 18, n. 7, p. 1447–1468, 1985b.

ALORAIER, A. *et al.* Role of welding parameters using the flux cored arc welding process of low alloy steels on bead geometry and mechanical properties. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 21, n. 4, p. 540–547, 2012.

ARMAO, F. *et al.* **Gas metal arc welding product and procedure selection**. Cleveland: Lincoln Global Inc., 2014.

ASM, I. **Welding, Brazering and Soldering**. [s.l: s.n.].

AWS A5.18/A5.18M. **Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding** Miami American Welding Society, , 2005.

BAIXO, C. E. I.; DUTRA, J. C. Efeito do gás de proteção e do modo de transferência na aplicação da liga 625 em aço carbono. **Soldagem e Inspecao**, v. 14, n. 4, p. 313–319, 2009.

BARBEDO, N. D. D. **Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica**. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2011.

CABRAL, T. DOS S. *et al.* Influência dos procedimentos e modos de transferência no processo MAG na redução de deformações em painéis de estruturas navais. **Soldagem & Inspeção**, v. 18, n. 4, p. 339–348, dez. 2013.

CABRAL, T. DOS S. *et al.* Influence of procedures and transfer modes in MAG welding in the reduction of deformations on marine structure panels. **Welding International**, v. 29, n. 12, p. 928–936, 2015.

CAI, X. *et al.* Effects of shielding gas composition on arc behaviors and weld formation in narrow gap tandem GMAW. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 91, n. 9–12, p. 3449–3456, 2017a.

CAI, X. *et al.* Effects of shielding gas composition on arc properties and wire melting characteristics in narrow gap MAG welding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 244, p. 225–230, 1 jun. 2017b.

CAIMACAN, D.; MISHCHENKO, A.; SCOTTI, A. Assessment of controlled short-circuiting application in filling passes with MIG/MAG double-wire process. **Welding International**, v. 31, n. 2, p. 90–99, 2016.

CAMPOS, P. T. DE. **Caracterização Mecânica e Microestrutural de juntas soldadas pelos processos MIG/MAG (GMAW) e arame tubular (FCAW)**. [s.l.] Pontifícia Universidade Católica Do Paraná, 2005.

CANTO, M. A. A. **Influência dos gases de proteção utilizados no processo MIG/MAG sobre as propriedades mecânicas do metal de solda**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1990.

CHANDRASEKARAN, R. R. *et al.* Multi-variable statistical models for predicting bead geometry in gas metal arc welding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, n. 1–4, p. 1573–1584, 14 nov. 2019.

CHOI, S. K. *et al.* Dynamic simulation of metal transfer in GMAW, Part 2: Short-circuit transfer mode. **Welding Journal**, v. 77, n. 1, p. 45s-51s, 1998.

COSTA, T. F. **Aplicação De Processos MAG Curto-Circuito Convencional e Controlado na Soldagem De Dutos De Aço Carbono**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

COSTA, T. F. *et al.* Avaliação de processos MIG/MAG curto-circuito convencional e controlado para a soldagem de dutos de aço carbono em passe único. **Soldagem & Inspeção**, v. 17, n. 4, p. 356–368, 2012.

DERUNTZ, B. D. Assessing the Benefits of Surface Tension Transfer® Welding to Industry. **Journal of Industrial Technology**, v. 19, n. 4, p. 1–8, 2003.

DUTRA, J. C.; SILVA, R. G. MIG/MAG - Transferência metálica por curto-circuito sob controle da forma de onda da corrente - Sistemas CCC e STT- Fundamentos. **Soldagem e Inspecao**, v. 13, n. 2, p. 92–96, 2008.

EBRAHIMNIA, M. *et al.* Study of the effect of shielding gas composition on the mechanical weld properties of steel ST 37-2 in gas metal arc welding. **Materials and Design**, v. 30, n. 9, p. 3891–3895, out. 2009.

FILHO, H. D. **MIG/MAG CCC - Avanços na Tecnologia de Controle da Transferência Metálica como Solução para o Passe de Raiz**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

FOGLIATTO, A. A. B. **Influência dos parâmetros do processo MIG/MAG com curto-circuito controlado sobre a geometria do cordão de solda**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

FONSECA, R. **Detecção e análise de Defeitos em Soldagem utilizando a técnica TOFD**. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2015.

FORTES, C.; VAZ, C. T. **Soldagem MIG/MAG**. [s.l.] ESAB, 2005.

GIRALDO, J. *et al.* Construcción de curvas de corriente de soldadura contra velocidad de alimentación de alambre para el proceso GMAW. **DYNA (Colombia)**, v. 76, n. 157, p. 205–212, 2009.

GOMES, E. B. **Análise do Comportamento da Soldagem por Curto-Circuito aplicado ao Processo Eletrodo Tubular através da Metodologia Taguchi**. [s.l.] Universidade Federal de Itajuba, 2006.

GREENE, W. J. An analysis of transfer in gas-shielded welding arcs. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry**, v. 79, n. 3, p. 194–203, 1960.

GROETELAARS, P. J.; SCOTTI, A. Influência do Teor de CO₂ no Gás de Proteção sobre a Transferência Metálica no Processo MIG/MAG Duplo-Arame. **Soldagem & Inspeção**, v. 12, n. 1, p. 29–37, 2007.

HERMANS, M. J. M.; OUDEN, G. DEN. Process Behavior and Stability in Short Circuit Gas Metal Arc Welding. **Welding Journal**, v. 78, n. 4, p. 137–141, 1999.

HINCAPIÉ, C. A. A. **Análise Microestrutural dos processos de soldagem MAG convencional, pulsado e pulsado térmico e sua relação com os níveis de energia**. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2015.

JÚNIOR, R. G. **Novos métodos de controle da soldagem MIG/MAG**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

KAH, P. *et al.* Usability of arc types in industrial welding. **International Journal of Mechanical and Materials Engineering**, v. 9, n. 1, p. 15, 25 dez. 2014.

KAH, P.; MARTIKAINEN, J. Influence of shielding gases in the welding of metals. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 64, n. 9–12, p. 1411–1421, 2013.

KAH, P.; SUORANTA, R.; MARTIKAINEN, J. Advanced gas metal arc welding processes. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 67, n. 1–4, p. 655–674, 30 jul. 2013.

KARADENIZ, E.; OZSARAC, U.; YILDIZ, C. The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes. **Materials and Design**, v. 28, n. 2, p. 649–656, 2007.

KATHERASAN, D.; SATHIYA, P.; RAJA, A. Shielding gas effects on flux cored arc welding of AISI 316L (N) austenitic stainless steel joints. **Materials and Design**, v. 45, p. 43–51, mar. 2013.

KIM, J. H.; FROST, R. H.; OLSON, D. L. Electrochemical oxygen transfer during direct current arc welding. **Welding Journal (Miami, Fla)**, v. 77, n. 12, p. 488s-494s, 1998.

KIM, Y.-S.; EAGAR, T. W. Analysis of metal transfer in gas metal arc welding. **Welding Journal**, p. 269–278, 1993.

KOU, S. **Welding Metallurgy**. Second ed. New jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003. v. 4

LANCASTER, J. F. **Metallurgy of Welding**. [s.l.: s.n.].

LATIFI, H. **Advanced Orbital Pipe Welding**. [s.l.] Lappeenranta University of Technology, 2012.

LIMA II, E. J. *et al.* Determinação da Relação Entre Parâmetros de Soldagem, Largura da Poça e Aspectos do Cordão de Solda Utilizando Câmera de Alta Velocidade. **Soldagem e Inspecao (Impresso)**, v. 10, n. 4, p. 163–170, 2005.

LINCOLN ELECTRIC COMPANY. **Surface Tension Transfer (STT) Waveform Control Technology**. Disponível em: <www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/NX220.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2020.

LISKEVYCH, O. **Estudo Da Influência Do Teor De CO2 Na Regularidade Da Transferência De Metal e Estabilidade Do Processo MIG/MAG**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2010.

LISKEVYCH, O.; SCOTTI, A. Influence of the CO2 content on operational performance of short-circuit GMAW. **Welding in the World**, v. 59, n. 2, p. 217–224, 18 mar. 2014.

LOPERA, J. E. P. **Modelagem empírica da transferência goticular projetada em processos de soldagem GMAW**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2010.

LU, S.; FUJII, H.; NOGI, K. Marangoni convection in weld pool in CO2-Ar-shielded gas thermal arc welding. **Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, v. 35 A, n. 9, p. 2861–2867, 2004.

LU, S.; FUJII, H.; NOGI, K. Weld shape variation and electrode oxidation behavior under Ar-(Ar-CO2) double shielded GTA welding. **Journal of Materials Science and Technology**, v. 26, n. 2, p. 170–176, 2010.

MACHADO, I. G. **Soldagem e técnicas conexas: Processos**. 1a. ed. Porto Alegre: [s.n.].

MALMUTH, N. D. *et al.* Transient Thermal Phenomena and Weld Geometry in GTAW. **Welding Journal**, v. 53, n. 9, p. 388- s to 400- s, 1974.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J. Algumas equações úteis em soldagem. **Soldagem & Inspeção**, v. 19, n. 1, p. 91–101, mar. 2014.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 4. ed. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

MATA, S. I. D. DA. **Análise do Processo MIG Pulsado-CA Aplicado à Soldagem do Alumínio 5052-H34**. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2017.

MODENESI, P. J. *et al.* Estudo de alguns parâmetros básicos da soldagem GMAW com transferência por curto-circuito. **Soldagem & Inspeção**, v. 16, n. 1, p. 12–21, mar. 2011.

MODENESI, P. J.; NIXON, J. H. Arc instability phenomena in GMA welding. **Welding Journal (Miami, Fla)**, v. 73, n. 9, p. 219s-224s, 1994.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. Eighth ed. [s.l.] John Wiley & Sons, Inc., 2012.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. Third ed. [s.l.] John Wiley & Sons, Inc., 2003.

MOREIRA, A. F. **Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido através dos processos de soldagem GMAW e FCAW**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2008.

MUKHOPADHYAY, S.; PAL, T. K. Effect of shielding gas mixture on gas metal arc welding of HSLA steel using solid and flux-cored wires. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 29, n. 3–4, p. 262–268, 2006.

MURUGAN, N.; GUNARAJ, V. Prediction and control of weld bead geometry and shape relationships in submerged arc welding of pipes. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 168, n. 3, p. 478–487, 2005.

MURUGAN, N.; PARMAR, R. S. Effects of MIG process parameters on the geometry of the bead in the automatic surfacing of stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 41, p. 381–398, 1994.

MVOLA, B. *et al.* State-of-the-art of advanced gas metal arc welding processes: Dissimilar metal welding. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 229, n. 10, p. 1694–1710, 2014.

MVOLA, B.; KAH, P. Effects of shielding gas control: welded joint properties in GMAW process optimization. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 88, n. 9–12, p. 2369–2387, 1 fev. 2017.

MVOLA, B.; KAH, P.; LAYUS, P. Review of current waveform control effects on weld geometry in gas metal arc welding process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 96, n. 9–12, p. 4243–4265, 2018.

NASCIMENTO, L. A. DO. **Avaliação dos processos GMAW com transferência por curto-circuito convencional e controlado (STT) aplicados na soldagem circunferencial mecanizada**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

NEMCHINSKY, V. A. The effect of the type of plasma gas on current constriction at the molten tip of an arc electrode. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 29, n. 5, p. 1202–1208, 1996.

NIST/SEMATECH. Engineering statistics handbook. **National Institute of Standards and Technology**, 2001.

NORRISH, J.; CUIURI, D. The controlled short circuit GMAW process: A tutorial. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 16, n. 1, p. 86–92, 2014.

O'BRIEN, A. **Welding Handbook: Welding Processes, part 1**. Ninth ed. Miami: American Welding Society, 2004. v. 2

OLIVEIRA, J. P.; SANTOS, T. G.; MIRANDA, R. M. Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice. **Progress in Materials Science**, v. 107, p. 100590, jan. 2020.

PENTEADO, K. M. **Otimização da Solda de Pontos por Resistência Elétrica na Liga de Alumínio 5052-H32 através do Projeto e Análise de Experimentos (DOE)**. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2011.

PÉPE, N. V. DA C. **Advances in Gas Metal Arc Welding and Application to Corrosion Resistant Alloy Pipes**. [s.l.] Cranfield University, 2010.

PIRES, I.; QUINTINO, L.; MIRANDA, R. M. Analysis of the influence of shielding gas mixtures on the gas metal arc welding metal transfer modes and fume formation rate. **Materials and Design**, v. 28, n. 5, p. 1623–1631, 2007.

POSSEBON, S. **Utilização de MIG/MAG com Curto-Circuito controlado na soldagem em operação**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

PRAVEEN, P.; YARLAGADDA, P. K. D. V.; KANG, M. J. Advancements in pulse gas metal arc welding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 164–165, p. 1113–1119, maio 2005.

RAO, Z. H.; LIAO, S. M.; TSAI, H. L. Effects of shielding gas compositions on arc plasma and metal transfer in gas metal arc welding. **Journal of Applied Physics**, v. 107, n. 4, p. 044902, 15 fev. 2010.

ROSADO, T.; ALMEIDA, P.; PIRES, I. MIRANDA, R. & QUINTINO, L. Innovations in arc welding. **5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia**, p. 2–4, 2008.

SARMA, D. Improving GMAW efficiency through shieldin gases. **Welding Journal**, v. 93, n. 12, p. 40–45, 2014.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento melhor desempenho**. São Paulo: [s.n.].

SILVA, C. R.; FERRARESI, V. A.; SCOTTI, A. A quality and cost approach for welding process selection. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences**, v. 22, n. 3, p. 389–398, 2000.

SILVA, E. P. DA. **Avaliação Comparativa dos processos de soldagem GMAW convencional e GMAW-STT em aço inoxidável duplex UNS S32205**. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2018.

SILVA, R. H. G. E. **Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por Curto-Circuito controlado aplicada ao passe de raiz**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

SILVA, R. H. G. E; DUTRA, J. C.; JR, R. G. Scientific and technological fundamentals for the development of the controlled short circuiting MIG/MAG welding process (CCC) – A literature review. Part 1 of 3: History and wire-electrode melting aspects. **Welding International**, v. 22, n. 12, p. 847–852, dez. 2008.

SILVA, R. H. G. E; DUTRA, J. C.; JR, R. G. Scientific and technological fundamentals for the development of the controlled short-circuiting MIG/MAG welding process: a review of the literature. Part 2 of 3. Metal droplet formation, shield gases, penetration mechanisms, heat input and economical asp. **Welding International**, v. 23, n. 2, p. 141–149, fev. 2009a.

SILVA, R. H. G. E; DUTRA, J. C.; JR, R. G. Scientific and technological fundamentals for the development of the controlled short circuiting MIG/MAG welding process (CCC) – A review of the literature. Part 3 of 3: principles of controlled current short circuiting MIG/MAG systems. **Welding International**, v. 23, n. 4, p. 251–260, abr. 2009b.

SOEIRO, J. C.; ROCHA, D. B.; BRANDI, S. D. Uma Breve Revisão Histórica do Desenvolvimento da Soldagem dos Aços API para Tubulações. **Soldagem e Inspecao**, v. 18, n. 2, p. 176–195, 2013.

SOUZA, D.; RESENDE, A. A. DE; SCOTTI, A. Um modelo qualitativo para explicar a influência da polaridade na taxa de fusão no processo MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção**, v. 14, n. 3, p. 192–198, set. 2009.

SPROESSER, G. *et al.* Energy efficiency and environmental impacts of high power gas metal arc welding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 91, n. 9–12, p. 3503–3513, 2017.

SUBAN, M.; TUŠEK, J. Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 119, n. 1–3, p. 185–192, 2001.

SUBRAMANIAM, S. *et al.* Droplet transfer in pulsed gas metal arc welding of aluminum. **Welding Journal (Miami, Fla)**, v. 77, n. 11, p. 458–464, 1998.

TANAKA, M. *et al.* Influence of shielding gas composition on arc properties in TIG welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 13, n. 3, p. 225–231, 4 abr. 2008.

UYGUR, I.; GULENC, B. The effect of shielding gas compositions for MIG welding process in mechanical behavior of low carbon steel. **Metalurgija**, v. 43, n. 1, p. 35–40, 2004.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. DE. **Soldagem: processos e metalurgia**. [s.l: s.n.].

WANG, L. L. *et al.* Effects of shielding gas composition on arc profile and molten pool dynamics in gas metal arc welding of steels. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 47, n. 46, 19 nov. 2014.

WASZINK, J. H.; GRAAT, L. H. J. Experimental Investigation of the Forces Acting on a Drop of Weld Metal. **Welding Journal (Miami, Fla)**, v. 62, n. 4, p. 108s-116s, 1983.

- WEMAN, K.; LINDÉN, G. **MIG welding guide**. [s.l.] Woodhead Publishing Limited, 2006.
- WILHELM, G. *et al.* Study of the welding gas influence on a controlled short-arc GMAW process by optical emission spectroscopy. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 43, n. 43, p. 434004, 3 nov. 2010.
- WONG, Y. R.; LING, S. F. An investigation of dynamical metal transfer in GMAW - Effects of argon shielding gas. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 214, n. 1, p. 106–111, 2014.
- WU, C. S.; CHEN, M. A.; LI, S. K. Analysis of excited droplet oscillation and detachment in active control of metal transfer. **Computational Materials Science**, v. 31, n. 1–2, p. 147–154, 2004.
- YANG, Z. *et al.* Effect of forces on dynamic metal transfer behavior of cable-type welding wire gas metal arc welding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 97, n. 1–4, p. 81–90, 1 jul. 2018.
- ZHU, Z. M.; WU, W. K.; CHEN, Q. Effective control approach on molten droplet size in waveform controlled short circuit CO₂ arc welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 12, n. 1, p. 55–62, 4 jan. 2007.
- ZIELINSKA, S. *et al.* Gas influence on the arc shape in MIG-MAG welding. **The European Physical Journal Applied Physics**, v. 43, n. 1, p. 111–122, 24 jul. 2008.
- ZIELIŃSKA, S. *et al.* Investigations of GMAW plasma by optical emission spectroscopy. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 16, n. 4, p. 832–838, 2007.