

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ALISSON CAETANO NEVES

**AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DO PROCESSO DE
REVESTIMENTO POR SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR
PULSADO ATRAVÉS DA ANÁLISE DOS SINAIS DE CORRENTE E
TENSÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2023

ALISSON CAETANO NEVES

**AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DO PROCESSO DE
REVESTIMENTO POR SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR
PULSADO ATRAVÉS DA ANÁLISE DOS SINAIS DE CORRENTE E
TENSÃO**

**Evaluation of the stability of the coating process with pulsed flux cored arc welding
through the analysis of current and voltage signals**

Dissertação apresentada com requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), multicampus Cornélio Procópio e Ponta Grossa.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Janaína Fracaro de Souza Gonçalves

Coorientador: Prof. Dr. Celso Alves Corrêa.

CORNÉLIO PROCÓPIO

2023



4.0 Internacional

Esta licença permite o download e o compartilhamento da obra desde que atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-la ou utilizá-la para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 66

Dissertação para Obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Ciências Mecânicas

Linha de Pesquisa: Caracterização de Materiais

No dia 09 de Novembro de 2023 às 14:00h, reuniu-se na Sala Remoto, a banca examinadora composta pelos pesquisadores indicados a seguir, para examinar a proposta de dissertação de mestrado do(a) candidato(a) **Alisson Caetano Neves**, intitulada:

Avaliação da estabilidade do processo de revestimento por soldagem com arame tubular pulsado através da análise dos sinais de corrente e tensão

Orientadora: Profa. Dra. Janaina Fracaro De Souza Goncalves

Co-orientador: Prof. Dr. Celso Alves Correa

Considerando o trabalho avaliado, formalizo para fins de registro, por meio desta declaração, minha decisão de que o(a) candidato(a) pode ser considerado(a): APROVADO [(1) Aprovado(a); ou (2) Aprovado(a) com Restrições; ou (3) Reprovado(a)].

Observações:

Nada mais havendo a tratar, a sessão foi encerrada às 16h15 min, dela sendo lavrada a presente ata, que segue assinada pela Banca Examinadora e pelo(a) Candidato(a).

O(A) candidato(a) está ciente que a concessão do referido título está condicionada à: (a) satisfação dos requisitos solicitados pela Banca Examinadora; (b) entrega da dissertação em conformidade com as normas exigidas pela UTFPR; (c) atendimento ao requisito de publicação estabelecido nas normas do Programa; e (d) entrega da documentação necessária para elaboração do Diploma. A Banca Examinadora determina um **prazo máximo de 40 dias**, considerando os prazos máximos definidos no Regulamento Geral do Programa, para o cumprimento dos requisitos (desconsiderar caso reprovado), sob pena de, não o fazendo, ser desvinculado do Programa sem o Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Assinam a presente ata os membros da Banca Examinadora e o(a) Candidato(a):

Profa. Dra. Janaina Fracaro De Souza Goncalves - Presidente - UTFPR

Prof. Dr. Hipolito Domingo Carvajal Fals - UTFPR

Prof. Dr. Ramon Sigifredo Cortes Paredes - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ (UFPR)

Candidato(a) [Alisson Caetano Neves]



Documento assinado eletronicamente por **ALISSON CAETANO NEVES, Candidato**, em 16/11/2023, às 13:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **JANAINA FRACARO DE SOUZA GONCALVES, Membro da Banca (Presidente)**, em 16/11/2023, às 13:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **HIPOLITO DOMINGO CARVAJAL FALS, Membro da Banca**, em 30/11/2023, às 13:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **RAMON SIGIFREDO CORTES PAREDES, Membro da Banca**, em 30/11/2023, às 17:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **THIAGO ANTONINI ALVES, Coordenador do Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica**, em 30/11/2023, às 23:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Este documento foi gerado eletronicamente em: 16/11/2023 13:57:03
Para conferir a autenticidade deste documento acesse:
<http://sistemas2.utfpr.edu.br/sistemas.utfpr.edu.br/documentos>
Informe o Código Verificador: **00263411** e Código CRC: **A4FOAED8**

AGRADECIMENTOS

Expressar gratidão a todos os que me auxiliaram nesta etapa da vida é uma tarefa árdua, pois ainda estaria cometendo injustiça ao não citar nominalmente todos. Aos que não se viram mencionados, saibam que manterei meu respeito e gratidão pelo apoio por toda minha existência.

Parte do trabalho é em homenagem a meus pais, Vicente e Silvia Cristina, e a minha namorada, Barbara Canedo. Sem seus suportes e compreensões, certamente não teria sequer iniciado minha carreira acadêmica.

Agradeço também às amigas que estiveram comigo durante essa trajetória: Ruhan Pontes Policarpo, Wesley Martins, e aos membros do grupo de amigos que sempre muda de nome. Daniel Roxo, Victor Ramos, Marcos Felipe Sant Anna, e aos demais membros do "Ecletismo Overrated". Victor Coutinho, Murilo Braga, Luiz Mateus Romano, e às demais amigas que fiz durante a graduação e que perduram até hoje.

Agradeço especialmente ao apoio do professor João Roberto Sartori Moreno, por ter me aceito inicialmente como orientando e ter dado auxílio nas etapas iniciais em minha trajetória acadêmica. Também agradeço aos meus orientadores, Janaína Fracaro de Souza Gonçalves e Celso Alves Corrêa, por todo auxílio nas pesquisas e direcionamento do projeto. Também gostaria de prestar gratidão ao professor Adriano Silva Borges: pela orientação acadêmica em minha etapa final de graduação, e pelas dicas essenciais que me motivaram a trilhar o caminho da pesquisa acadêmica.

Por fim, agradeço ao coletivo de criadores de conteúdo marxista-leninista Soberana e ao seu Projeto de Saúde Mental Camaradas (SAMECA), que reúne profissionais da psicologia com o objetivo de oferecer apoio e assistência psicológica humanizada a pessoas de diversas faixas etárias e condições sociais. Foi por meio deste coletivo que pude compreender a verdadeira força da organização popular para transformar a sociedade.

*"Intra limpidus
obscura
Limen ex nihilum
Opacitas
Trux omnillustrare
Ex regnum de
exsanguis
Lux absentia, funditus"
(Gorguts - Obscura)*

RESUMO

NEVES, Alisson Caetano. **Avaliação da estabilidade do processo de revestimento por soldagem com arame tubular pulsado através da análise dos sinais de corrente e tensão**. 2023. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio. 2023.

Este estudo analisa soldas de revestimento usando soldagem com arame tubular e corrente contínua pulsada. O objetivo é avaliar a validade de métodos de verificação de estabilidade através de oscilogramas de corrente, tensão e potência. Corpos de prova de aço SAE 1020 foram empregados com um cordão de arame tubular *metal cored* inoxidável martensítico 410 NiMo. As variáveis principais foram corrente média, frequência de pulsação, velocidade de soldagem e distância bico de contato peça. O método de Taguchi foi aplicado para reduzir combinações, totalizando 9 ensaios. A estabilidade foi avaliada quantitativamente com base em oscilogramas, usando índices para o processo pulsado, e analisando histogramas e ciclogramas. Índices de regularidade de transferência foram adaptados ao contexto da corrente pulsada. A análise de variância validou os resultados, estabelecendo relações entre parâmetros e índices. Modelagens de regressão e análise da morfologia dos cordões de solda complementaram a avaliação. A aplicabilidade das ferramentas de análise de regressão e variância para as inter-relações no processo com arame tubular pulsado foi confirmada. Regressões eficazes utilizaram tensão, corrente e potência média, com índice R^2 ajustado acima de 85%. A quantidade de picos por segundo esteve alinhada com a frequência de pulsação, fornecendo clareza na avaliação, mas não relacionou-se claramente com a qualidade dos cordões. O índice de transferência IV_{cc} correlacionou-se significativamente com variações dos dados, apresentando índices entre 0,154 e 2,797 e valores mais baixos com corrente de 170 A e índice de convexidade entre 36,75% e 52,42%. A área do ciclograma teve correlação tênue com resultados de reforço, sugerindo ajustes na metodologia de obtenção deste dado, seja por melhor processamento de imagem ou outro método.

Palavras-chave: Soldagem com Arame Tubular Pulsado; Processamento de sinais; Índice de qualidade; Soldagem de revestimento.

ABSTRACT

NEVES, Alisson Caetano. **Evaluation of the stability of the coating process with pulsed flux cored arc welding through the analysis of current and voltage signals.** 2023. 117 p. Dissertation (Master's degree in Mechanical Engineering), Federal University of Technology, Paraná. Cornélio Procópio. 2023.

This study analyzes overlay welds using flux-cored welding and pulsed direct current. The objective is to evaluate the effectiveness of stability verification methods through current, voltage, and power oscillograms. SAE 1020 steel specimens were used with a 410 NiMo martensitic stainless metal cored tubular wire strand. The main variables were average current, pulsation frequency, welding speed, and contact-tip-to-work distance. Taguchi's method was applied to reduce combinations, totaling nine trials. Stability was evaluated quantitatively based on oscillograms, using indices for the pulsed process, and analyzing histograms and cyclograms. Transfer regularity indices were adapted to the context of pulsed current. Analysis of variance validated the results, establishing relationships between parameters and indices. Regression modeling and weld bead morphology analysis complemented the evaluation. The effectiveness of the regression and variance analysis tools for the interrelationships in the pulsed flux cored wire process was confirmed. Effective regressions used voltage, current, and average power, with the R^2 index adjusted above 85%. The number of spikes per second was in line with the pulse rate, providing clarity in the assessment, but it was not related to the quality of the cords. The transfer index IV_{cc} correlated significantly with data variations, showing indices between 0.154 and 2.797, lower values with a current of 170 A, and convexity index between 36.75% and 52.42 %. The cyclogram area had a tenuous correlation with reinforcement results, suggesting adjustments in the methodology for obtaining this data, either through better image processing or another method.

Keywords: P-FCAW; Signal processing; Quality index; Coating Welding.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Processo de soldagem FCAW-G (a) e Processo de soldagem FCAW-S (b). . .	21
Figura 2 – Equipamentos para soldagem com processo FCAW.	22
Figura 3 – Comparativo das taxas de deposição de diferentes processos de soldagem à arco elétrico.	23
Figura 4 – Exemplo da seção transversal e parâmetros do cordão para soldas de revestimento.	24
Figura 5 – Aparência comum dos principais modos de transferência metálica por curto circuito.	27
Figura 6 – Aparência comum dos principais modos de transferência metálica do tipo globular	28
Figura 7 – Aparência comum dos principais modos de transferência metálica do tipo spray	28
Figura 8 – Formato característico de uma onda pulsada.	32
Figura 9 – Fenômeno de formação de gota no modo de transferência de ODPP.	34
Figura 10 – Categorias de variáveis envolvidas no processo de soldagem GMAW.	36
Figura 11 – Nomenclatura dos principais elementos e parâmetros do processo GMAW / FCAW.	37
Figura 12 – Efeito da corrente de transição nas características de deposição e diâmetro de gota.	38
Figura 13 – Raio-X de cordões de solda exemplificando o surgimento de defeitos: (a) Porosidade; (b) Fratura.	39
Figura 14 – Estimativa da relação entre a corrente e o diâmetro de gota.	40
Figura 15 – Ângulos de tocha e efeitos no cordão de solda.	45
Figura 16 – Largura do cordão de solda × Velocidade de soldagem para os processos FCAW e TIG/FCAW.	46
Figura 17 – Métodos de sensoriamento para captura de dados de soldagem.	47
Figura 18 – Metodologias utilizadas para estimar a estabilidade na soldagem.	48
Figura 19 – Métodos de visualização do fenômeno de transferência metálica.	49
Figura 20 – Sobreposição dos oscilogramas de corrente e tensão.	50
Figura 21 – Comparação da área elíptica de ciclogramas gerados a partir de ensaios realizados em três condições de operação: soldagem robotizada, e por dois operadores iniciantes.	51
Figura 22 – Representação gráfica dos parâmetros da análise de variância de um conjunto de dados de: 8 observações para 3 grupos.	55
Figura 23 – Exemplos gráficos de modelos de regressão linear.	57
Figura 24 – Sequenciamento das atividades para realização do estudo.	62
Figura 25 – Setup experimental dos ensaios (UTFPR campus Cornélio Procópio/PR). . .	64

Figura 26 – Diagrama de blocos simplificado do sistema de medição e aquisição de dados.	65
Figura 27 – Seções transversais de cordões embutidos para processo de medição: (a) ensaio 1; (b) ensaio 6; (c) ensaio 9.	71
Figura 28 – Ilustração dos resultados morfológicos dos cordões.	71
Figura 29 – Gráfico de efeitos principais para os parâmetros de morfologia.	72
Figura 30 – Probabilidade normal dos resíduos para as variáveis: largura, reforço, e índice de convexidade.	74
Figura 31 – Oscilogramas de tensão dos ensaios e exemplo de janelamento de amostra. .	75
Figura 32 – Sobreposições dos oscilogramas de corrente e tensão de amostras extraídas no período de 8,0 a 8,5 segundos de todos os ensaios.	76
Figura 33 – Histograma com curva de distribuição normal das amostras de corrente dos ensaios com $I_m = 170 A$	77
Figura 34 – Histograma com curva de distribuição normal das amostras de corrente dos ensaios com $I_m = 200 A$	78
Figura 35 – Histograma com curva de distribuição normal das amostras de corrente dos ensaios com $I_m = 230 A$	79
Figura 36 – Histograma com curva de distribuição normal das amostras de tensão dos ensaios com $I_m = 170 A$	80
Figura 37 – Histograma com curva de distribuição normal das amostras de tensão dos ensaios com $I_m = 200 A$	80
Figura 38 – Histograma com curva de distribuição normal das amostras de tensão dos ensaios com $I_m = 230 A$	81
Figura 39 – Ciclograma das amostras dos ensaios com $I_m = 170 A$	81
Figura 40 – Ciclograma das amostras dos ensaios com $I_m = 200 A$	82
Figura 41 – Ciclograma das amostras dos ensaios com $I_m = 230 A$	83
Figura 42 – Espectros de frequência dos oscilogramas de tensão dos ensaios.	83
Figura 43 – Probabilidade normal dos resíduos dos sinais elétricos dos ensaios	87
Figura 44 – Gráfico de efeitos principais para os sinais elétricos do processo: tensão, corrente e potência média.	89
Figura 45 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para Picos/s, IV_{cc} , e Área do Ciclograma.	94
Figura 46 – Comparativo entre resultados numéricos e morfologia de cordões resultantes.	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Relação de artigos sobre processos de revestimento com soldagem FCAW.	26
Tabela 2	– Modos de transferência metálica pela classificação da IIW.	29
Tabela 3	– Processos avançados de soldagem GMAW.	31
Tabela 4	– Valores experimentais de coeficiente de destacamento de gota.	41
Tabela 5	– Relação de artigos sobre visualização do arco elétrico.	49
Tabela 6	– Relação de artigos sobre o Índice Vilarinho de Regularidade.	52
Tabela 7	– Relação de artigos sobre a verificação da estabilidade do processo via método de Farias (1993).	53
Tabela 8	– Modelo generalizado de tabela ANOVA para um fator categórico.	56
Tabela 9	– Relação de artigos sobre soldagem que utilizam ferramentas ANOVA e ANCOVA em diferentes circunstâncias.	61
Tabela 10	– Composição química das barras de aço SAE 1020 utilizadas.	63
Tabela 11	– Composição química do arame tubular EC410 NiMo.	63
Tabela 12	– Eficiências estimadas para combinações de corrente média, tensão e taxa de deposição para o arame tubular EC410 NiMo 1,2 mm de diâmetro.	63
Tabela 13	– Informações técnicas da fonte de soldagem.	64
Tabela 14	– Parâmetros de soldagem constantes nos ensaios.	66
Tabela 15	– Variáveis de influência e os níveis avaliados.	67
Tabela 16	– Combinação de parâmetros para realização dos ensaios.	67
Tabela 17	– Resultados das morfologias de cordão obtidos a partir dos ensaios.	70
Tabela 18	– Resultados da ANOVA para a equação de regressão da variável Largura.	72
Tabela 19	– Resultados da ANOVA para a equação de regressão da variável Reforço.	73
Tabela 20	– Resultados da ANOVA para a equação de regressão da variável Índice de Convexidade.	73
Tabela 21	– Resumo das ANOVAs, com os p-valores resultantes para Largura, Reforço e Índice de Convexidade.	73
Tabela 22	– Sumário resumido dos modelos de regressão dos parâmetros de morfologia.	74
Tabela 23	– Intervalos de tempos analisados em cada ensaio.	75
Tabela 24	– Resultados de corrente, tensão e potência média registrados nas amostras dos ensaios com $I_m = 170A$	84
Tabela 25	– Resultados de corrente, tensão e potência média registrados nas amostras dos ensaios com $I_m = 200A$	84
Tabela 26	– Resultados de corrente, tensão e potência média registrados nas amostras dos ensaios com $I_m = 230A$	85
Tabela 27	– Teste-T para 1 amostra com os resultados de corrente média.	85
Tabela 28	– Resultados da ANOVA para a equação de regressão da variável Tensão Média.	86

Tabela 29 – Resultados da ANOVA para a equação de regressão da variável Corrente Média.	86
Tabela 30 – Resultados da ANOVA para a equação de regressão da variável Potência Média.	86
Tabela 31 – Resumo das ANOVAs, com os p-valores resultantes para tensão, corrente e potência média.	87
Tabela 32 – Sumário resumido dos modelos de regressão dos sinais elétricos.	88
Tabela 33 – Resultados dos índices de verificação de estabilidade extraídos a partir das amostras do ensaios com $I_m = 170A$	90
Tabela 34 – Resultados dos índices de verificação de estabilidade extraídos a partir das amostras do ensaios com $I_m = 200A$	90
Tabela 35 – Resultados dos índices de verificação de estabilidade extraídos a partir das amostras do ensaios com $I_m = 230A$	91
Tabela 36 – Teste-T para 1 amostra para avaliação dos resultados de picos/s.	91
Tabela 37 – Resultados da ANOVA para a equação de regressão da variável Picos/s.	92
Tabela 38 – Resultados da ANOVA para a equação de regressão da variável IV_{cc}	92
Tabela 39 – Resultados da ANOVA para a equação de regressão da variável Área do Ciclograma.	93
Tabela 40 – Sumário resumido dos modelos de regressão dos índices numéricos de estabilidade.	93
Tabela 41 – Matriz de Correlação.	95
Tabela 42 – Resultados da ANOVA para a equação de regressão da variável F_{cc}	117
Tabela 43 – Resultados da ANOVA para a equação de regressão da variável F_{tm}	117
Tabela 44 – Resultados da ANOVA para a equação de regressão da variável R_{cc}	117

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Limite de segurança;
α'	Coefficiente de contribuição do calor para fusão do arame [m/s.A];
β	Coefficiente de contribuição do calor para fusão do arame [$s^{-1}A^{-2}$];
δ	Diluição;
ϵ	Resíduos;
ϵ_r	Erro relativo;
η	Rendimento;
θ	Ângulo da tocha;
ν	Velocidade de soldagem;
ϕ_e	Diâmetro do eletrodo;
ϕ_g	Diâmetro da gota;
ρ	Coefficiente de correlação (Pearson);
ρ_a	Densidade linear do arame;
σ_x	Desvio padrão (variável "x" genérica);
φ	Eficiência de deposição do processo;
Ω	Resistência elétrica;
A	Área de reforço;
A_p	Área de penetração;
A_w	Área de seção transversal do eletrodo;
A_d	Área de seção transversal do cordão de solda;
D	Coefficiente de destacamento de gota;
E_1	Energia dissipada;
F_{cc}	Facilidade de ocorrência do curto-circuito;
FE	Facilidade de Transferência de carga elétrica;

F_{tm}	Facilidade de transferência da gota no curto-circuito;
f_p	Frequência de pulsação;
H_0	Hipótese nula;
H_1	Hipótese alternativa;
I_{DC}	Corrente desviada média;
I_{pmax}	Corrente de pico máximo;
I_{pmin}	Corrente de pico mínimo;
I_b	Corrente de base;
I_m	Corrente média;
I_p	Corrente de pico;
I_{SP}	Salto de corrente de pico;
I_t	Corrente de transição;
IV_{cc}	Índice Vilarinho de Regularidade de Transferência no modo Curto-Circuito;
$d.f.$	Graus de liberdade;
k	Constante de consumo;
L	Largura do cordão;
L_a	Comprimento de arame consumido;
LT	Largura total do revestimento;
m_f	Massa final da junta após a soldagem;
m_i	Massa inicial da junta antes da soldagem;
N_P	Pico número "p";
\bar{P}	Potência elétrica média;
Pe	Penetração;
P_1	Potência de reabertura de arco elétrico;
P_r	Potência de referência;
\dot{Q}	Taxa de calor gerado por efeito Joule;

R	Reforço do cordão de solda;
R^2	Coeficiente de determinação;
RE	Regularidade de transferência de carga elétrica;
R_{cc}	Regularidade de ocorrência do curto-circuito;
R_{tm}	Regularidade de transferência de gota no curto-circuito;
S	Desvio padrão da distância entre dados e ajustados;
SS_{exp}	Soma explicada dos quadrados;
SS_{res}	Soma residual dos quadrados;
SS_T	Quantidade total de soma de quadrados;
s	Comprimento energizado do arame;
t	Tempo de processo;
t_b	Tempo de base;
T_D	Taxa de deposição do arame;
T_F	Taxa de fusão do arame;
T_{IDC}	Intervalo de tempo médio da corrente desviada;
T_{NP}	Tempo inicial correspondente aos picos " N_P ";
t_{ab}	Tempo de arco aberto;
t_{cc}	Tempo de curto-circuito;
t_p	Tempo de pico;
T_p	Período de pulsação;
\bar{V}	Tensão média;
V_a	Velocidade de alimentação;
w	Velocidade de fusão do arame.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivos específicos	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Processo de soldagem à arco elétrico com Arame Tubular	20
2.2	Soldagem de Revestimento	24
2.3	Transferência metálica no processo GMAW	26
2.4	Soldagem com Corrente Contínua Pulsada	32
2.4.1	Modos de transferência no processo pulsado	34
2.5	Definição dos parâmetros de soldagem	35
2.5.1	Seleção dos parâmetros de pulso	39
2.5.2	Seleção do consumível	42
2.5.3	Seleção dos gases de proteção	43
2.5.4	Parâmetros secundários	44
2.6	Estabilidade do Processo e Métodos de Averiguação	45
2.6.1	Critérios Quantitativos de Averiguação de Estabilidade	51
2.7	Análise de Variância e Covariância	54
3	MATERIAIS E MÉTODOS	62
3.1	Metal de Base e Arame Tubular	62
3.2	Ambiente de soldagem	63
3.3	Sistema de Aquisição de Dados	64
3.4	Parametrização dos ensaios e avaliação dos resultados	65
3.4.1	Análise estatística dos resultados	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.1	Morfologia do Cordão de Solda	69
4.2	Análise dos sinais elétricos	74
4.3	Índices de Verificação de Estabilidade	88
5	CONCLUSÕES	97
5.1	Perspectivas para trabalhos futuros	98
5.2	Trabalhos relacionados à pesquisa	99
	REFERÊNCIAS	100

APÊNDICE A – HISTOGRAMAS E CURVA DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL DOS DADOS DE TENSÃO	112
APÊNDICE B – HISTOGRAMAS E CURVA DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL DOS DADOS DE CORRENTE	113
APÊNDICE C – CICLOGRAMAS DE POTÊNCIA DOS ENSAIOS .	114
APÊNDICE D – RESULTADOS DE CORRENTE, POTÊNCIA E TENSÃO MÉDIA DOS ENSAIOS	115
APÊNDICE E – RESULTADOS MÉDIOS DOS ÍNDICES DE VERIFICAÇÃO DE ESTABILIDADE	116
APÊNDICE F – ANÁLISES DE VARIÂNCIA DOS ÍNDICES DE FACILIDADE E REGULARIDADE DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-CIRCUITO	117

1 INTRODUÇÃO

A soldagem representa uma evolução significativa nos métodos de fabricação de materiais metálicos, especialmente quando comparada às técnicas ancestrais, como o forjamento e a fundição, que remontam ao século XII. Contudo, a inovação da soldagem utilizando o arco elétrico como fonte calorífica só ganhou destaque no final do século XIX, sendo largamente utilizada desde então. Tal trajetória histórica apenas evidencia a constante busca por avanços tecnológicos na área.

A soldagem à arco elétrico com arame tubular (FCAW - *Flux Cored Arc Welding*) originou-se da busca por métodos mais eficazes, visando alternativas rentáveis e confiáveis. Esta técnica, uma extensão da soldagem à arco elétrico com gás de proteção (GMAW - *Gas Metal Arc Welding*), oferece vantagens tanto em termos metalúrgicos, devido aos elementos de liga no arame consumível, quanto em produtividade devido à alimentação contínua de arame e facilidade de automação (MACHADO, 1996). O arame consumível protege as gotas durante a transferência e contribui para a formação do cordão de solda. Com a introdução da corrente pulsada e utilização de tecnologia eletrônica avançada, pôde-se alcançar níveis de qualidade superiores de controle e estabilidade (GHOSH, 2017).

Os avanços tecnológicos não resultaram apenas em equipamentos e métodos mais complexos. Simultaneamente, houve um crescimento nos estudos teóricos focando na qualidade, conformidade com padrões e normas técnicas e estabilidade, seja durante ou após a soldagem (BRAGA, 1997; JILUAN, 2003). Este conhecimento não só oferece *insights* sobre os fenômenos envolvidos, mas também ajuda a prever e avaliar a qualidade final do cordão (SOUZA, 2010; AMERICAN WELDING SOCIETY, 2014). A busca por desempenho eficaz na soldagem, portanto, centra-se na estabilidade do arco elétrico e no fenômeno de transferência metálica (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

Diferentes metodologias têm sido propostas para avaliar a estabilidade da soldagem. Por exemplo, Biao et al. (2008) relacionou a entropia aproximada da corrente à estabilidade em processo GMAW operando por curto-circuito. Outros estudos focam em estatísticas de sinais de corrente e tensão (NEVES et al., 2021b), enquanto outros propõem índices numéricos que traduzem variações intrínsecas à transferência metálica (BRAGA, 1997; REZENDE et al., 2011; LANKIN, 2011). Além disso, técnicas visuais e análises de oscilogramas têm sido aplicadas para compreender em minúcias o fenômeno físico de formação do arco e desprendimento de material (PINTO et al., 2011; OGUNBIYI; NORRISH, 1997).

Embora o termo "estabilidade" seja corriqueiro em estudos de soldagem, incertezas quanto a correlação desta com a parametrização ainda são habituais, sendo comum a definição de parâmetros estando ainda em dependência de correlações entre processos distintos, caso dos processos FCAW e MIG/MAG. Mesmo que estudos recentes tenham se debruçado em definir matematicamente o processo FCAW em termos de morfologia do cordão e resultados mecânicos

do material depositado (PYO et al., 2022; YANG et al., 2023), ainda existem brechas teóricas a serem preenchidas, especialmente em relação às variantes com imposição de transferência metálica. Tendo em vista a importância dos estudos a respeito da estabilidade do processo de soldagem, e também das particularidades envolvendo sua manutenção durante sua execução, a verificação da estabilidade do processo por todas as etapas de sua execução de forma aprofundada torna-se uma via de estudo de importância para obter-se maiores conclusões acerca da estabilidade do processo e maneira mais específica.

1.1 Objetivos

Analisar e quantificar a estabilidade de processos de soldagem de revestimento com arame tubular e corrente contínua pulsada (P-FCAW) através da avaliação dos oscilogramas de corrente e tensão oriundos de ensaios previamente realizados.

1.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram fundamentados em associar as melhores condições operacionais de soldagem com arame tubular pulsado baseado nos resultados das avaliações estatísticas dos sinais e índices numéricos, com validação baseada nos resultados dimensionais dos cordões:

1. Fornecer mais detalhes sobre a operacionalização de soldagens com arame tubular e corrente pulsada com a exploração de variáveis de influência em diferentes níveis operacionais. Para tal, o uso de metodologia estatística será utilizada para contribuir com uma parametrização mais precisa do processo;
2. Estudar a qualidade da manutenção dos sinais de corrente e tensão gerados pela fonte de soldagem em relação às configurações operacionais por meio de análise estatística e uso de teste de hipótese (teste-t);
3. Investigar estratégias para integrar de forma mais eficaz as ferramentas gráficas, como oscilogramas, histogramas e ciclogramas, na análise de transferência metálica. Explorar como essas ferramentas podem complementar e melhorar a interpretação de dados numéricos extraídos dos oscilogramas;
4. Estudar a dependência dos critérios de análise de estabilidade em relação à variação dos parâmetros de soldagem através da aplicação de técnicas estatísticas de análise de variância (ANOVA), análise de covariância (ANCOVA), modelagem por regressão linear, e análise de correlação (Pearson);
5. Reforçar os estudos da relação entre índices numéricos de estabilidade de soldagem e a geometria do cordão. Revalidar os resultados para fortalecer a confiabilidade dessas métricas como auxílio na parametrização de ensaios;

6. Realizar uma avaliação mais detalhada da contagem de picos de tensão por segundo, investigando ainda mais os fenômenos de instabilidades no processo. Explorar a hipótese relacionada à faixa operacional de corrente média e oscilações inesperadas nos dados de tensão;
7. Correlacionar os resultados numéricos dos critérios de estabilidade com a análise visual e dimensional dos cordões de solda, considerando reforço, largura, diluição e índice de convexidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Serão expostos neste capítulo as descrições sintéticas sobre os principais tópicos que compõem a presente pesquisa científica. A revisão foi feita com base em literatura já estabelecida da área, além de busca por pesquisas e trabalhos recentes, de maneira a embasar a interpretação dos temas desenvolvidos.

A estruturação dos conceitos proposta no capítulo é iniciar-se a partir do macro, ou seja, da definição dos processos de soldagem com arame tubular: sua história, desenvolvimento, conceitos básicos, aplicações, vantagens e limitações; e a partir disso, adentrar nos tópicos mais específicos e pertinentes ao projeto: soldagem de revestimento, formas de transferência metálica, processo com corrente pulsada e conceitos de estabilidade do processo de soldagem, bem como outros temas pertinentes ao entendimento dos resultados obtidos na pesquisa.

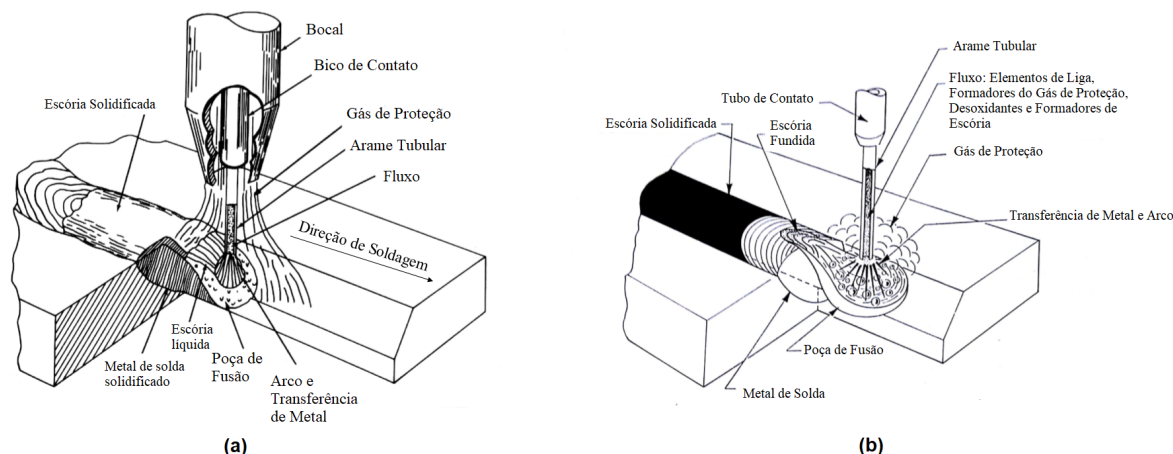
2.1 Processo de soldagem à arco elétrico com Arame Tubular

A soldagem à arco elétrico com arame tubular (FCAW - *Flux Cored Arc Welding*) é um processo que utiliza o arco elétrico como fonte de calor para promover a fusão entre o metal de base e um metal de adição, fornecido na forma de arame e alimentado de maneira contínua. Seu desenvolvimento teve início durante os anos 1950, como uma forma de atingir resultados mais produtivos em comparação às alternativas já estabelecidas, como os processos com eletrodos revestidos. Sua operação requer equipamentos similares aos utilizados nos processos GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), como pode ser observado na Figura 2. Uma fonte de soldagem, que pode variar em tecnologia embarcada e nas possibilidades de controle de parâmetros; alimentador de arame consumível e controlador de velocidade de alimentação; tocha de soldagem; cabos de alimentação e cilindro com gás de proteção, que pode ou não ser dispensado do uso neste caso (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991).

Segundo a American Welding Society (1991), dentro desta técnica, existem duas variações principais que se diferenciam principalmente pela forma como a proteção da poça de fusão é realizada. Na primeira, conhecida como FCAW-S (*Self-Shielded Flux Cored Arc Welding*), em destaque na Figura 1(a), a proteção é garantida pelos gases produzidos a partir da queima do conteúdo interno (fluxo) do arame tubular. Esta técnica é frequentemente escolhida por sua simplicidade e eficácia. Já a segunda, denominada FCAW-G (*Gas Shielded Flux Cored Arc Welding*), apresentada na Figura 1(b), além dos gases originados pela queima do fluxo, são também adicionados gases externos ao processo através do bocal. Estes podem ser gases ativos, inertes, ou uma combinação de ambos (mais frequente), garantindo uma proteção adicional e resultando em uma soldagem potencialmente mais refinada.

O arame tubular é fabricado no formato de um arame oco com seção transversal tubular preenchido com material denominado fluxo. A composição do fluxo é produzida a partir de

Figura 1 – Processo de soldagem FCAW-G (a) e Processo de soldagem FCAW-S (b).

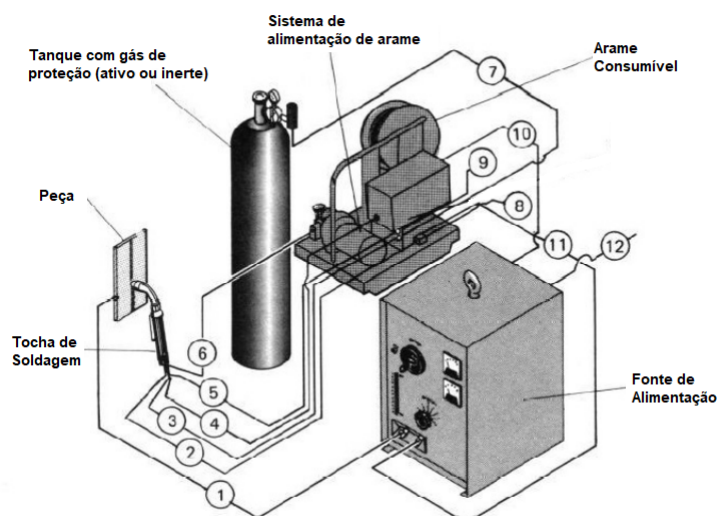


Fonte: Adaptado de American Welding Society (1991).

uma mistura de elementos de liga e desoxidantes. Dentre as funções as quais o fluxo pode desempenhar, elencam-se: metalúrgicas, pela presença de elementos de formação de liga, como cromo, níquel, silício e manganês; estabilização de arco com a presença de minerais, como feldspato e a cal; formação de gases de proteção da zona de solda por meio da decomposição do carbonato de cálcio; desoxidantes e desnitrificantes pela presença de titânio, alumínio, manganês e silício; e formação de escória para proteção do cordão de solda e proteção da gota no instante da transferência metálica, função desempenhada por elementos rutiícos, como o dióxido de titânio, a fluorita e o feldspato (NATALIE; OLSON; BLANDER, 1986; AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1983). A classificação dos arames tubulares quanto à composição do fluxo é:

- Com uso de gases de proteção externo:
 - *Metal Cored*: O fluxo deste tipo de arame é constituído por pós metálicos. São consumíveis que proporcionam maior eficiência de deposição, geram menor quantidade de fumos, maior estabilidade do arco e menor quantidade de respingos;
 - *Flux Cored*: O fluxo é composto por pós não-metálicos com função protetora da poça de fusão, com produção de escória. Podem proporcionar maior velocidade de soldagem e operações fora de posição.
- Sem uso de gases de proteção externo:
 - Auto-protegidos: O fluxo é composto por elementos que, ao se fundirem com a energia liberada pelo processo, geram gases para proteção da poça de fusão, contribuindo assim com a estabilização do arco. Dispensam a utilização de fonte externa de gases de proteção.

Figura 2 – Equipamentos para soldagem com processo FCAW.



Fonte: Adaptado de ESAB (2004).

A classificação dos arames tubulares comerciais é feita pela AWS e leva em consideração a composição principal do metal de adição. Os arames de aço carbono e aços de baixa liga podem ser identificados pelo padrão de nomenclatura

$$EXXT - X,$$

onde "E" representa eletrodo, os dois primeiros "X" indicam, respectivamente: a resistência à tração mínima do metal depositado (em *kpsi*) mensurado em ensaios normalizados de acordo com o consumível e condições de soldagem especificadas; e a posição de soldagem principal pela qual aquele consumível é designado, onde "0" indica posição plana e horizontal, e "1" representa todas as posições possíveis. "T" indica que o consumível trata-se de um arame tubular, enquanto que o último "X" indica a capacidade de uso e desempenho (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2021; AMERICAN WELDING SOCIETY, 2022; AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1983).

Classificação similar é utilizada para identificar os consumíveis de aço inoxidável e à base de níquel, com o padrão de nomenclatura

$$EXXXT - X,$$

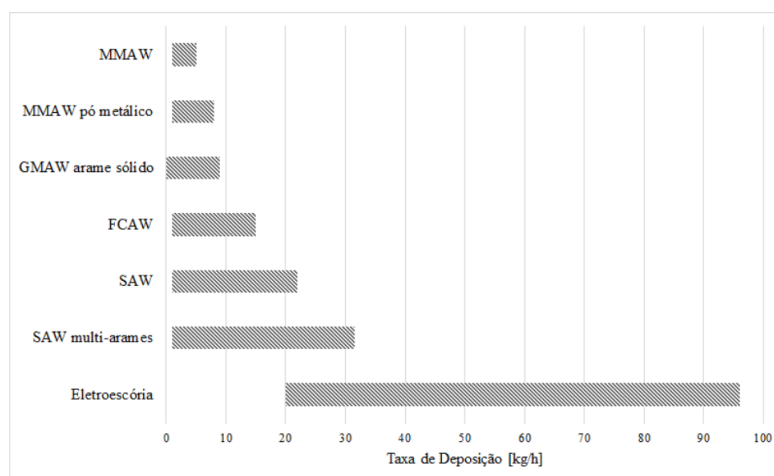
onde as três primeiras posições indicam a composição química da liga seguindo o padrão instituído pela *American Iron and Steel Institute* (AISI) (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2012; AMERICAN WELDING SOCIETY, 2020; AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1983). O último caractere designa o tipo de proteção:

- T-1: consumíveis para uso conjunto com CO₂;

- T-2: consumíveis para uso conjunto com Ar-2%O₂;
- T-3: consumíveis auto-protegidos ;
- T-4: consumíveis para uso com combinação de 75% a 80% de Ar + CO₂;
- T-G: consumíveis não descritos pelas categorias anteriores.

O processo com arame tubular possui vantagens devido, segundo Machado (1996), três pontos principais: produtividade, alcançada graças à possibilidade de semi-automatização do processo e da alimentação contínua de arame; benefícios metalúrgicos, advindo dos elementos de liga presentes no fluxo; e proteção da zona de fusão pelos gases gerados da queima do fluxo. Mesmo similar aos processos GMAW, as particularidades do arame tubular fazem com que seja possível atingir taxas de deposição superiores à ele, como é possível observar pela Figura 3. A abrangência de aplicações do processo FCAW estende-se à uma variedade considerável de ligas metálicas, como aços carbono, aços inoxidáveis e de baixa liga. Os consumíveis auto-protegidos são comumente preferidos para aplicações em ambientes externos, enquanto que consumíveis para uso no processo FCAW-G encontram aplicação bem sucedida em juntas de vasos de pressão e em exigências de resistência mecânica e corrosiva elevadas, como recuperação de pás de turbinas hidráulicas e soldas em ambiente subaquático (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1983; CORREA, 2000; ANAND; KHAJURIA, 2013).

Figura 3 – Comparativo das taxas de deposição de diferentes processos de soldagem à arco elétrico.



Fonte: Adaptado de Norrish (2006).

Dentre as limitações inerentes ao processo FCAW, segundo Jeffus e Bower (2010), estão:

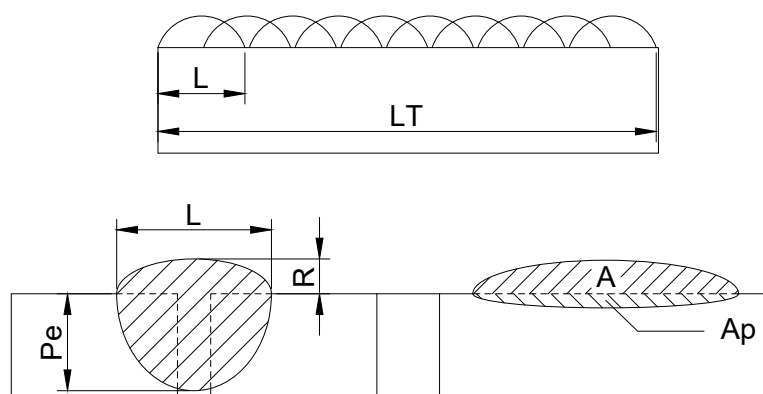
- Custo relativo dos equipamentos superior à processos de soldagem mais simples, especialmente em processos automatizados;

- A remoção de escória requer etapa extra de produção. O fluxo deve ser removido antes que a soldagem seja finalizada para evitar corrosão em frestas;
- Maior exposição do operador à radiação e à fumos gerados da queima dos componentes do consumível, sendo necessário equipamentos de proteção individual e maior atenção quando o processo for realizado em locais fechados.

2.2 Soldagem de Revestimento

O revestimento por soldagem é definido como a deposição de uma ou várias camadas na superfície de um material com o objetivo de obter melhorias nas propriedades superficiais de um material/componente, aumento dimensional do elemento ou prorrogação da vida útil do mesmo. No processo, a superfície é preparada para receber os cordões de solda, que são realizados lateralmente e com sobreposição de um cordão ao outro, como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Exemplo da seção transversal e parâmetros do cordão para soldas de revestimento.



Fonte: Adaptado de Pessoa et al. (2011) e Antunes (2010).

onde:

- P_e : Penetração;
- L : Largura;
- LT : Largura do revestimento;
- R : Reforço;
- A : Área de reforço;
- A_p : Área de Penetração;

Os parâmetros (Figura 4) que definem um cordão de solda de revestimento são os mesmos de um cordão de solda convencional. A diferença da solda de revestimento está nos valores pretendidos destes parâmetros. Deseja-se uma reduzida área de penetração e reforço baixo, maior largura do cordão e baixa diluição. A diluição de uma solda (δ) é a razão entre a área de penetração pela área total da seção transversal da solda, que é a somatória da área de penetração e da área de reforço. A diluição de uma solda pode ser obtida pela Equação 2.1.

$$\delta = \frac{A_p}{A_p + A}. \quad (2.1)$$

Outra relação importante para configurar uma solda de revestimento é a porcentagem do índice de convexidade (IC), Equação 2.2, que é a relação entre o reforço (R) e a largura do cordão (L). Quando tem-se um valor elevado de reforço em relação à largura, torna-se necessário a execução de vários passes para o preenchimento de uma superfície. Por outro lado, pode-se fazer necessário passes de sobreposição quando o reforço for reduzido e a largura for elevada, para uma cobertura adequada.

$$IC = \frac{R}{L} \times 100\%. \quad (2.2)$$

A *American Society of Materials* (ASM) define uma faixa para a área de revestimento dentre 5 à 50% da espessura do material, com valores práticos na faixa dos 10 à 20% e espessura mínima de 1,5 mm (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1983). Ou seja, busca-se um baixo percentual de área de mistura entre o metal de base e de solda e menor zona termicamente afetada possível. Por sua vez, estudos conduzidos por Nascimento e Pukasiewicz (2016) apontam índices de convexidade aceitáveis para revestimentos realizados com processo FCAW próximos de 30%. Acima desta faixa, os cordões passam a gerar excesso de reforço com baixa penetração, possibilitando que a ação de esforços transversais fragilizem e/ou rompam com mais facilidade o cordão aplicado (GOMES et al., 2019; BONANNI, 2005).

A adição de uma camada superficial de material em um substrato pode ser utilizado visando diversos propósitos: a recuperação de peças que sofreram desgastes superficiais, como o rotor de turbinas hidráulicas; revestimento de peças que atuam em ambientes corrosivos; ou a proteção de partes mais exigidas mecanicamente de um conjunto. Em casos onde o nível de desgaste é rápido e os custos de substituição de todo o conjunto são muito altos, o revestimento por soldagem utilizando ligas com propriedades mecânicas mais apropriadas à atuação em ambientes com fatores deteriorantes torna-se uma alternativa mais viável.

Revestimentos podem ser realizados utilizando diferentes processos de soldagem, à depender do nível de qualidade pretendido, ou particularidades do projeto. A maior utilização da soldagem MIG/MAG e, atualmente dos eletrodos revestidos, deve-se pela facilidade de manuseio do equipamento e da possibilidade da automatização. O depósito de revestimentos via processo FCAW vem sendo atualmente empregado, especialmente para aplicação de revestimentos duros e de ligas de diferentes composições, como pode ser observado nos diferentes estudos elencados no Tabela 1.

Tabela 1 – Relação de artigos sobre processos de revestimento com soldagem FCAW.

Referência	Variável de Pesquisa	Metal de Adição	Metal de Base
Nogueira, Bohórquez e Zanella (2015)	$I = 100 - 340A$ CC $I = 100 - 180A$ CC-P	AWS ER70S-6 AWS E71T-1	SAE 1020
Viegas (2016)	$I = 180 - 248ACC+$	DIN 8555 MF10-GF-60-GR	Hardox
Souza e Ferraresi (2017)	$V = 32V$	FeCrC, FeCrC+Ti FeCrC+Nb	SAE 1020+E308LSi SAE 1020
Valle (2017)	$I_m = 230A$ CC-P	410 CA6NM	SAE 1020
Sartori (2019)	$I = 200A$ CC e CC-P	EC410 NiMo	SAE 1020
Cavalcante et al. (2020)	$V = 28 - 32V$	FeCrC + Nb	SAE 1020
Sousa, Lobato e Garcia (2021)	$I = 285 - 325A$	FeCrC	SAE 1020
Ivanov et al. (2022)	$I = 150A$ CC	FeTiMoBC	DSTU 7809:2015

Fonte: Autoria Própria.

2.3 Transferência metálica no processo GMAW

Em descrição simplificada, o fenômeno da transferência metálica é o deslocamento de material fundido da ponta do consumível (arame ou eletrodo) em direção à poça de fusão, onde diferentes consumíveis à diferentes condições de operação definirão a frequência do fenômeno e o volume de material deslocado.

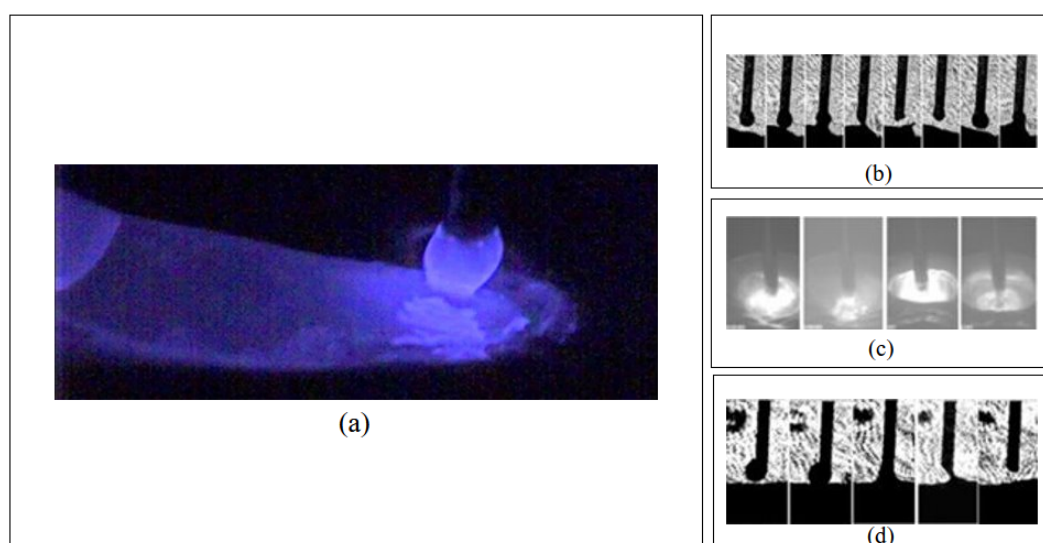
Em soldagens com operação de corrente em modelo convencional, os modos de transferência metálica são controlados pelas intensidades do sinal de corrente e de tensão, além da velocidade (alimentação do arame). Demais parâmetros também possuem influência na formação da gota, como a polaridade e gases de proteção utilizados. A parametrização seguindo recomendações de fabricantes e manuais de operação são a forma mais provável de se obter determinado modo de transferência.

São considerados três modos básicos de transferência metálica, classificados pelas forças que atuam no desprendimento da gota do arame: globular, *spray* e curto-circuito. A forma de transferência metálica nos processos de soldagem tem importância para o controle da produtividade do processo pois, ao obter parâmetros que resultem em transferências estáveis e periódicas, há maior eficiência, redução de respingos em um cordão de solda com melhor aparência e homogeneidade (KHAN, 2009).

O modo de transferência por curto-circuito (Figura 5) caracteriza-se pelo arame fundido

entrando em contato com a poça de fusão, fazendo com que a gota desprenda-se devido ao rompimento da tensão superficial do metal fundido e por forças eletromagnéticas. Este fenômeno ocorre com uma frequência controlada pela parametrização do processo, e gera um oscilograma de fácil observação do fenômeno, onde a corrente atinge picos de amplitude quando o curto-circuito ocorre, simultaneamente à tensão atingindo valores de amplitude mínima. É um processo que pode gerar respingos e instabilidade, mas que possibilita a soldagem em todas as posições e em chapas de pequenas espessuras (ESAB, 2013).

Figura 5 – Aparência comum dos principais modos de transferência metálica por curto circuito: Captura do momento do desprendimento de material e toque com a poça de fusão (a); Curto-circuito convencional (b); Curto-circuito forçado (c); Ponte (d).

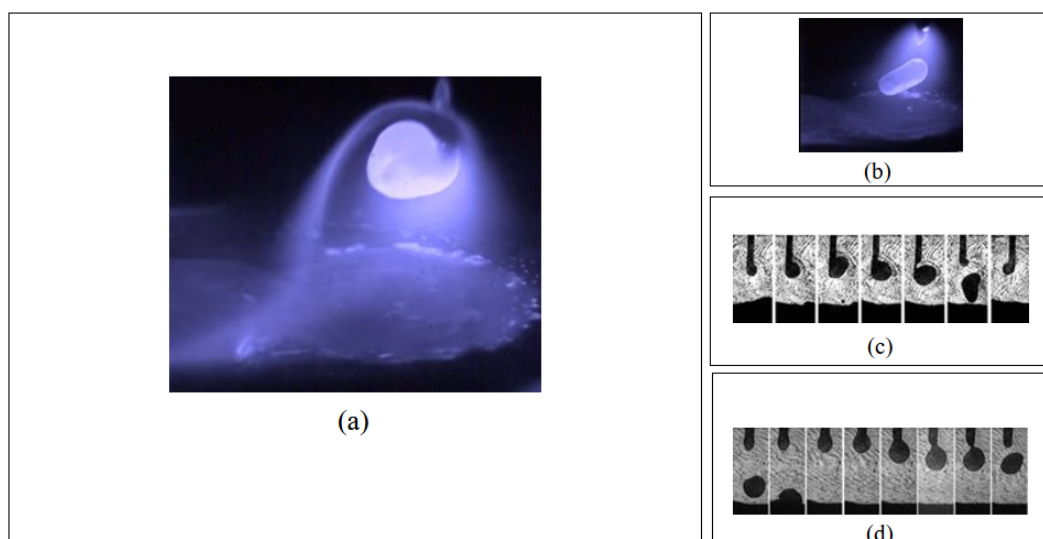


Fonte: Adaptado de Scotti, Ponomarev e Lucas (2012) e Welding Tech (2019a).

A transferência globular (Figura 6) ocorre em condições de comprimento de arco mais elevado e corrente mais reduzida que na transferência por curto-circuito. Com isso, o metal funde-se na ponta do eletrodo, configurando gotas com diâmetro maior que o diâmetro do arame sólido, vindo a se desprender por efeito da gravidade. Também pode gerar respingos e um processo instável devido à grande perturbação causada pelo deslocamento de grande quantidade de material, e limita-se à soldagens em posição plana, sendo comumente usado em processos FCAW com proteção de CO₂ ou em processos com arame sólido (ESAB, 2013; MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

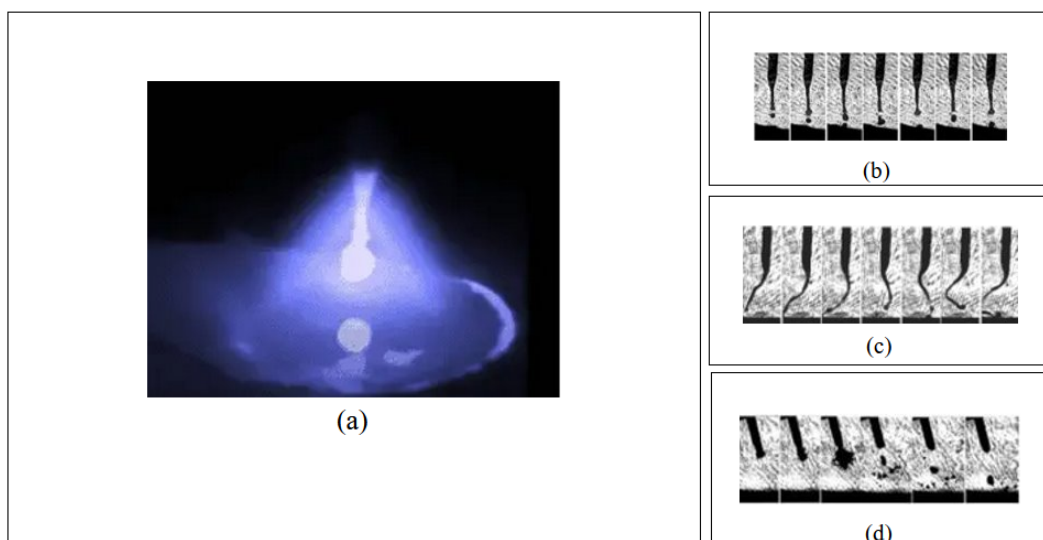
A transferência *spray* (Figura 7) ocorre em processos operando com faixas de corrente e velocidade de alimentação de arame mais elevadas, circunstâncias onde a força gravitacional não é mais relevante para o desprendimento das gotas, que apresentam diâmetro menor à igual ao diâmetro do arame, com desprendimento de múltiplas gotas na região do arco. Como não ocorre encerramento de arco, há uma baixa ocorrência de respingos. É considerada uma transferência mais estável que as demais, sendo indicada para soldas em juntas de elevada espessura (ESAB, 2013; MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Figura 6 – Aparência comum dos principais modos de transferência metálica do tipo globular: Formação da gota na ponta do arame (a); Transferência da gota do arame para a poça de fusão (b); Transferência globular tradicional (c); Globular repelido (d).



Fonte: Adaptado de Scotti, Ponomarev e Lucas (2012) e Welding Tech (2019b).

Figura 7 – Aparência comum dos principais modos de transferência metálica do tipo spray: Formação e sucessivo desprendimento de gota do arame (a); Fluxo de spray (b); Spray rotativo (c); Explosivo (d).



Fonte: Adaptado de Scotti, Ponomarev e Lucas (2012) e Material Welding (2023).

A *International Institute of Welding* (IIW) considera as designações descritas no Tabela 2, fornecendo uma descrição sobre as forças que governam os respectivos fenômenos. Lucas, Iordachescu e Ponomarev (2005) propõem a classificação, também aceita, segundo letras alfabéticas (A - curto-circuito; B - globular; C - pulsada; D - spray; E - rotativa), e sobrescritos (N - transferência natural; C - transferência controlada).

Tabela 2 – Modos de transferência metálica pela classificação da IIW.

Modo de Transferência	Forças envolvidas na transferência
1. Transferência <i>Free Flight</i>	
1.1 Globular	
1.1.1 Goticular	Gravitacional e aperto eletromagnética
1.1.2 Repelido	Geração de vapor de reação química
1.2 <i>Spray</i>	
1.2.1 Projetado	Instabilidade de aperto eletromagnética
1.2.2 Fluxo	Eletromagnético
1.2.3 Rotacional	Instabilidade de torção eletromagnética
1.3 Explosivo	Reação química para formar uma bolha de gás
2. Transferência por Ponte	
2.1 curto-circuito	Tensão superficial e forças eletromagnéticas
2.2 Ponte sem interrupção	Tensão superficial e forças eletromagnéticas
3. Transferência com proteção de escória	
3.1 Guiado pela Parede de Fluxo	Química e eletromagnética
3.2 Outros modos	Química e eletromagnética

Fonte: Traduzido e adaptado de Teixeira e Mazzaferro (2019).

Na transferência metálica da soldagem FCAW, o fenômeno apresenta singularidades devido à composição e formato de seção transversal específicos do arame. O fluxo interno desempenha um papel crucial na condução da corrente elétrica até a formação do arco, que ocorre externamente ao fluxo. Essa característica diferencia as condições para a fusão do fluxo, tornando-as menos favoráveis se comparadas a outros processos, como o arco submerso e eletrodos revestidos, nos quais a proteção do arco é realizada por um fluxo externo (MODENESI, 2007).

Assim como em arames sólidos, a intensidade de corrente na soldagem FCAW é inversamente proporcional ao diâmetro da gota e diretamente proporcional à frequência de destacamento. A composição dos gases também exerce influência significativa no comportamento do arco, contribuindo para a formação de uma coluna de fluxo que interage com a poça de fusão, afetando, assim, o processo de transferência metálica (STARLING; MODENESI, 2007).

A composição do fluxo tem impacto imediato na formação da gota e condução elétrica: de maneira generalizada, arames com fluxo metálico e baixa concentração de aditivos não-metálicos possuem comportamento similar aos chamados arames sólidos. Trinh et al. (2021) demonstrou que a presença de elementos não-metálicos (sódio, em seu estudo) em consumíveis de fluxo metálico possuem efeitos na frequência de transferência metálica e também para o surgimento de uma coluna de plasma de sódio, o que facilita o estabelecimento de um caminho para a corrente no arco, reduzindo a pressão do arco e aumentando a força eletromagnética agindo no desprendimento de material. Elementos estabilizadores auxiliam a operação em modelos não repulsivos e com eletrodo negativo. Elementos rúflicos apresentam tendência a operação no modo globular com formação de uma coluna de fluxo projetada em direção à poça. Consumíveis básicos operam em formato globular repulsivo para baixas correntes, tornando-se repulsiva em

função do aumento da corrente e da composição gasosa (MODENESI, 2007).

Na atualidade, fontes de soldagem com tecnologia de controle digital possibilitam diferentes situações de transferência por intermédio do controle dinâmico dos parâmetros de processo e do arco elétrico. Este controle não limita-se apenas às variáveis primárias, mas também podem atuar no controle de variáveis de fundo do processo, ou seja, um controle sinérgico das variáveis do processo, como é possível observar pelos processos descritos na Tabela 3 (KAH; SUORANTA; MARTIKAINEN, 2013).

Tabela 3 – Processos avançados de soldagem GMAW.

Tipo de Controle	Processo	Ano de introdução	Modo de transferência principal	Descrição
Regulagem avançada da fonte de soldagem	WiseRoot™	2005	Curto-circuito	Controle via monitoramento do sinal de corrente, de forma a obter melhor frequência do fenômeno.
	<i>Surface tension transfer™</i> (STT)	2003	Curto-circuito	Controle via ajuste na taxa de calor através de ajustes do sinal de corrente, sem influência na tensão
	<i>Regulated metal deposition™</i> (RMD)	2004	Curto-circuito	Controle com auxílio de monitoramento e modificação da corrente do eletrodo.
	ColdArc™	2004	Curto-circuito	Controle com auxílio de comutador inversor altamente dinâmico
	ColdMIG™	2007	Curto-circuito	Controle através de <i>software</i> de monitoramento do sinal
	<i>Intelligent Arc Control™</i> (IAC)	2010	Curto-circuito	Ajuste do arco à alta frequência por meio de registro de ciclo de soldagem
	<i>Super-Imposition™</i> (SP-MAG)	2011	Curto-circuito	Controle do sinal de corrente para impôr o fenômeno de curto-circuito de forma mais acelerada
	<i>Controlled bridge transfer™</i> (CBT)	2008	Curto-circuito	Alteração no sinal de corrente para reduzir o calor gerado e respingos no momento do desprendimento de material
Transferência metálica mecanicamente assistida	<i>Cold Metal transfer™</i> (CMT)	2004	Curto-circuito	Controle digital de alta velocidade, inversor e processador para gerenciar o comprimento do arco, corrente e tensão do processo
	MicroMIG™process	2009	Curto-circuito/Pulsado	Sequências de pulsação são inseridas entre o destacamento mecânico. A taxa de destacamento é controlado pela frequência de pulsos inseridos
Processo MIG-AC	AC-MIG OTC-Daihen™	2008	Pulsado	Utilização de inversores para controle do calor gerado no processo via sinal de corrente.
	GLC 353 QUINTO CP™	2002	Pulsado	Pioneiro no desenvolvimento de sistemas de soldagem MIG/MAG-AC
<i>Pulse Spray/short circuit metal transfer</i>	<i>Pulse/Pulse™</i>	2003	Pulsado; Pulso/curto	Pulso/spray; Permite alterações nas propriedades da corrente de pulso, podendo intercalar processo pulsado e convencional.

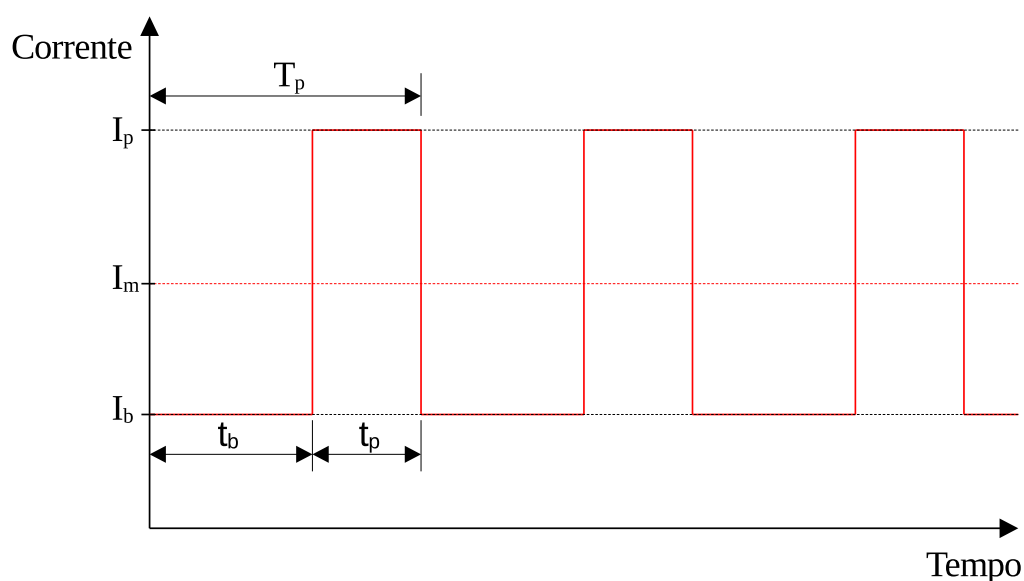
Fonte: Adaptado de Kah, Suoranta e Martikainen (2013).

2.4 Soldagem com Corrente Contínua Pulsada

A corrente contínua pulsada é uma imposição artificial do fenômeno de transferência metálica por intervenção do ciclo de operações do sistema de arco, sendo assim considerada um modo artificial de transferência metálica. A corrente pulsada trata-se da alternância da amplitude de corrente de maneira periódica, sem a alternância de fase. Ambas as amplitudes mínimas e máximas são configuradas pelo operador na fonte de soldagem que gera o sinal. O tempo de permanência nas amplitudes mínima e máxima são parâmetros de onda de grande importância para a correta parametrização do processo (BRACARENSE, 2000). Os parâmetros que caracterizam a corrente pulsada são: corrente de pico (I_p), corrente de base (I_b), corrente média (I_m), tempo de pico (t_p), tempo de base (t_b) e a frequência de pulsação (f_p). O formato característico de uma onda pulsada pode ser visualizado na Figura 8.

A corrente de pico possui a função de aumento na aceleração momentânea da taxa de fusão do arame. Por sua vez, a corrente de base possui algumas funções distintas, dentre elas: manter o arco aberto, gerar uniformidade na limpeza catódica, dar início ao processo de fusão do arame e dar início ao processo de formação e crescimento da gota metálica, além de promover a regulação na taxa de calor envolvida no processo, evitando superaquecimento progressivo da região (ANDRADE, 2012). Conseqüentemente, é possível afirmar que o objetivo fundamental do uso da corrente pulsada é proporcionar o aumento da relação entre potência do processo/velocidade do arame, uma vez que ela é muito baixa no modo de transferência por curto-circuito (DUTRA; MARQUES; SILVA, 2012).

Figura 8 – Formato característico de uma onda pulsada.



Fonte: Autoria Própria.

A corrente média (I_m) pode ser calculada através da relação entre os parâmetros de

corrente de pico e corrente de base pela Equação 2.3 e Equação 2.4,

$$I_m = \frac{I_p \times t_p + I_b \times t_b}{T_p}, \quad (2.3)$$

$$f_p = \frac{1}{T_p} = \frac{1}{t_p + t_b}, \quad (2.4)$$

onde:

- I_p : Corrente de pico;
- I_b : Corrente de base;
- T_p : Período médio de pulsação;
- f_p : Frequência média de pulsação;
- t_p : Tempo de pico;
- t_b : Tempo de base.

O controle artificial da transferência metálica via pulsação de corrente é um conceito introduzido em aplicações industriais práticas durante os anos 1960. Porém, por conta de entraves nos sistemas eletrônicos das fontes de soldagem da época, haviam ainda limitações quanto à frequência do sinal, que ficavam fixadas à frequência fornecida pela concessionária de energia (entre 50 e 60 Hz). Além disso, a intensidade da corrente média do sinal gerado era mais baixa que a corrente gerada em processos convencionais, o que impedia que fosse obtida a mesma zona fundida com a mesma penetração (BRACARENSE, 2000).

Vários processos de soldagem obtêm vantagens da utilização da corrente pulsada, como os processos MIG/MAG, TIG e a soldagem à plasma. Consequentemente ao controle da transferência metálica, é possível obter, com isso, maior qualidade no processo, estabilização do arco, aumento da penetração, maior controle calorífico, aumento do rendimento pela maior deposição e redução de respingos e maior qualidade da estrutura solidificada (HIRATA, 2003).

Concomitante ao controle do processo, obtém-se também um aumento na taxa de deposição de material quando comparado o mesmo processo em condições de corrente convencional. Krishnan, Kulkarni e De (2016) demonstraram em estudos um aumento de 42% na taxa de deposição em processos P-FCAW. Além disso, estudos da área de morfologia e resistência do cordão de solda demonstraram benefícios no uso da corrente pulsada, especificamente nas propriedades mecânicas e na morfologia das dendritas, com a pulsação promovendo vibrações na poça de fusão, resultando em mudanças no estado de solidificação do metal de solda, melhorando as condições de segregação e promovendo o surgimento de dendritas, que são benéficas para a ductilidade da junta soldada (DI; DENG; WANG, 2015).

De forma geral, portanto, as principais vantagens do uso da corrente contínua pulsada para o processo de soldagem podem ser categorizadas em:

- Melhor penetração quando comparado à processos com corrente convencional;
- Maior controle da temperatura do processo;
- Soldagem em materiais mais sensíveis ao calor, evitando distorções geométricas;
- Soldagem de chapas finas.

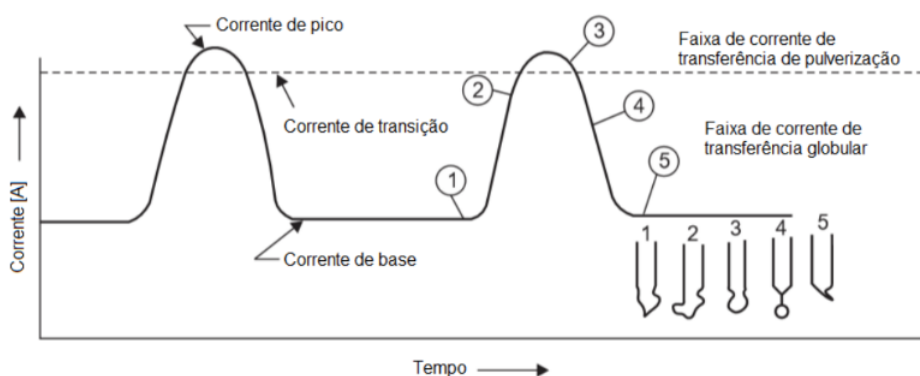
2.4.1 Modos de transferência no processo pulsado

No modo pulsado, são considerados três tipos básicos de transferência metálica, classificadas pela frequência da transferência metálica:

- Uma gota por pulso (ODPP - *one drop per pulse*);
- Múltiplas gotas por pulso;
- Múltiplos pulsos para destacamento.

No modo de transferência ODPP, a transferência metálica tende a ser mais previsível e, conseqüentemente, estável, já que o fenômeno tende a seguir a mesma periodicidade que a pulsação da corrente, como é possível observar no modelo simplificado da Figura 9, onde cada etapa enumerada corresponde a:

Figura 9 – Fenômeno de formação de gota no modo de transferência de ODPP.



Fonte: Adaptado de Khan (2009).

1. Início da formação da gota, que compreende a transição entre a corrente de base e a corrente de pico;
2. A gota começa a tomar formato devido à elevação da temperatura, etapa que compreende o momento próximo ao início da fase de corrente de pico;

3. A gota, já com formato definido, começa a desprender-se do arame, estimulado pelo aumento da pressão gerado pela corrente de pico. Esta etapa tende a ocorrer próximo ao fim da fase de corrente de pico;
4. A gota desprende-se do arame durante a transição entre a corrente de pico para a corrente de base;
5. Devido ao encerramento do ciclo de transferência, a temperatura reduz-se, interrompendo a fusão do arame até que o próximo ciclo de transferência inicie-se.

As demais formas de transferência metálica ocorrem pela incorreta parametrização do processo. No caso de múltiplas gotas por pulso, o fenômeno tende a ocorrer quando o tempo de pico perdura por muito tempo (tempos de base muito altos também podem ocasionar desprendimento de material) ou quando a corrente de base é mais elevada que apenas o suficiente para manter o arco aberto. Por sua vez, quando o destacamento requer múltiplos pulsos para formação de uma gota, é caracterizado uma transferência do tipo globular pulsada. Isso ocorre em casos onde a frequência de pulsação é elevada e o patamar da corrente de pulso é muito baixo. Isso faz com que mais tempo seja necessário para gerar energia suficiente para desprender a gota do arame. Ambos os formatos de transferência não possibilitam o devido controle e manutenção do arco, além de gerarem mais distúrbios e respingos que no modo ODPP (SUBRAMANIAM et al., 1998).

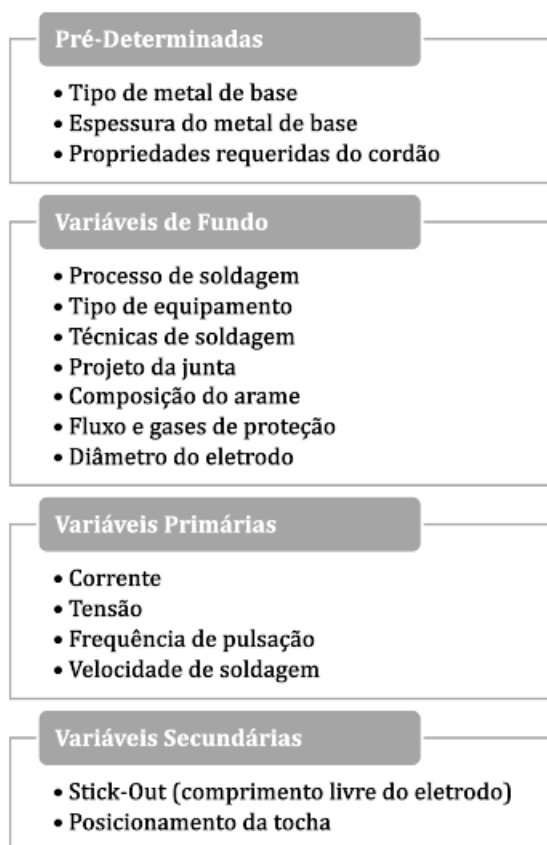
2.5 Definição dos parâmetros de soldagem

A soldagem tem diferentes variáveis que possuem influências no resultado final, além da inter-relação entre variáveis: a variação de um parâmetro afetará diretamente na definição de outro parâmetro. Segundo Jones (1978), existem quatro grupos de variáveis em um processo de soldagem à arco elétrico (Figura 10):

- **Pré-determinadas:** são as definidas nas primeiras etapas da fase de projeto, e que possuem as menores chances de serem alteradas. Geralmente estão atreladas à especificações do cliente ou condições previamente impostas do ambiente, estrutura ou componente a ser soldado;
- **Variáveis de Fundo:** são definidas nos estágios iniciais de execução ou, em alguns casos, definidas levando em conta ferramental e matéria-prima disponíveis;
- **Variáveis Primárias:** são definidas no estágio final do projeto, e possuem controle direto assim que as variáveis anteriores tenham sido definidas. São as variáveis que dão formato ao cordão e definem com maior intensidade a estabilidade do arco e o rendimento do processo;

- **Variáveis Secundárias:** Assim como as primárias, também são definidas em estágio final de projeto, também influenciam diretamente na geometria e rendimento, porém são mais difíceis de quantificar o efeito de sua influência no resultado final.

Figura 10 – Categorias de variáveis envolvidas no processo de soldagem GMAW.



Fonte: Adaptado de Jones (1978).

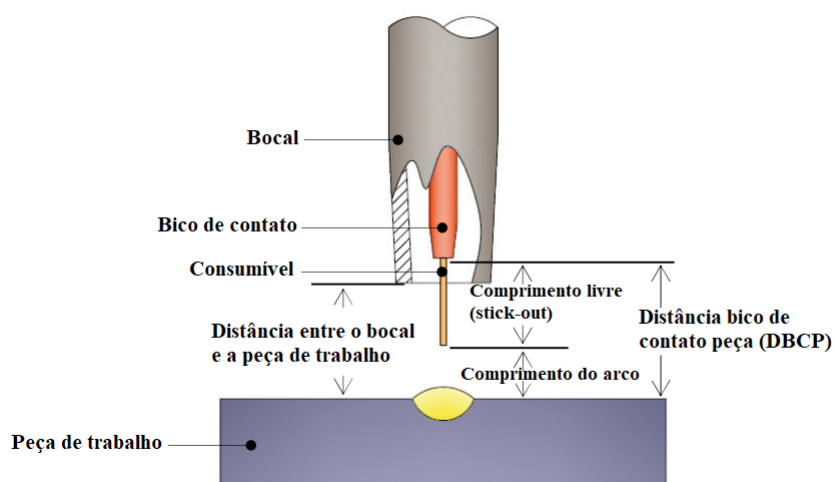
A escolha dos parâmetros elétricos e de materiais para execução da soldagem devem levar em conta diferentes condições, dentre elas: o material a que se está executando a operação; a aplicação que aquele material será destinado, ou, a depender do caso, as solicitações a que estará submetido o componente soldado; espessura da chapa; condições do ambiente externo e até mesmo as condições e limitações da fonte de soldagem. Portanto, a consulta à catálogos de fornecedores torna-se uma necessidade, tendo em vista que, em sua grande maioria, os mesmos trazem informações quanto à faixa de operação de determinado consumível, reações metalúrgicas do mesmo com diferentes materiais base, dentre outras informações consideráveis.

Instabilidades no processo podem surgir devido à três fatores: variações na velocidade de alimentação do arame, re-ignições do arco elétrico e curto-circuitos instantâneos (HERMANS; Den Ouden, 1999). O primeiro fator deve-se à variações no comprimento de *stick-out*, ou comprimento livre do eletrodo. Em processos semi-automatizados, como o MIG/MAG, o controle da distância DBCP é estabelecida de forma a manter uma média operacional para manutenção

da coluna de arco e garantir diferença de potencial estável. Para soldas menos criteriosas, a variação desta distância é aceitável em certo nível, mas torna-se um problema para processos mais controlados, já que a variação do *stick-out* reflete-se na resistência do sistema e na distribuição de calor associada ao aquecimento anódico e ao efeito Joule: quanto maior é o *stick-out*, maior a porção por efeito Joule, o que pode acarretar em um superaquecimento do eletrodo (SILVA et al., 2018). Experimentalmente, o aumento do *stick-out* reflete-se em queda da corrente operacional devido ao aumento da impedância do circuito. Os efeitos físicos citados anteriormente também resultam em propriedades geométricas do cordão alteradas, já que a intensidade da corrente é afetada, provocando um campo magnético mais fraco e menor pressão sobre a poça de fusão, fazendo com que a diluição final do cordão seja afetada (SILVA et al., 2018). Em soldas com arames tubulares, o *stick-out* é particularmente importante pois é o parâmetro que torna possível alterar a energia de soldagem sem que a quantidade de material depositado seja afetada (PIĄTKOWSKI; MARMOŁOWSKI, 2011).

A reignição do arco é um fenômeno que ocorre no modo de transferência por curto-circuito, sendo o momento que precede a transferência metálica (extinção do arco), havendo uma elevação na corrente do processo até que o arco se restabeleça, podendo haver vaporização de parte do material e geração de respingos (MODENESI, 2007). Por sua vez, curto-circuito instantâneo é definido como o contato entre o arame e a peça por tempo insuficiente para gerar transferência metálica. Este fenômeno é observado quando o tempo de pico é muito longo e o tempo de base é muito curto, ou também quando a amplitude da corrente de pico e de base é elevada (PRAVEEN; KANG; YARLAGADDA, 2006).

Figura 11 – Nomenclatura dos principais elementos e parâmetros do processo GMAW / FCAW.



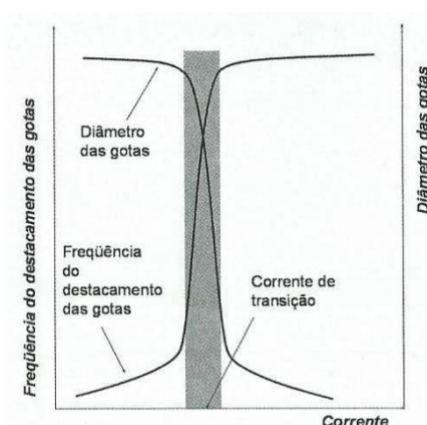
Fonte: Adaptado de Cayo (2008).

Alfaro e Puñales (2021) associam a estabilidade do processo com o comportamento operacional para a manutenção e regularidade do arco elétrico através da escolha dos parâmetros para o processo que são responsáveis por sua manutenção. Desta forma, se o gás de proteção utilizado não for fornecido corretamente, o arco não inicia, podendo haver a ionização do plasma

estável ou contínua, afetando no efeito protetor. O efeito da má preparação do local de solda tem consequências para a estabilidade, já que a presença de graxas, tintas ou demais contaminantes podem criar variações na tensão de soldagem.

Os parâmetros com maior influência para a estabilidade do processo são a corrente, tensão de soldagem, o comprimento de *stick-out* (comprimento livre do eletrodo) e as características do gás e proteção (composição e vazão). A corrente é a responsável por induzir as oscilações, já que é responsável por induzir o arco elétrico. Além disso, sua amplitude é responsável por dar a característica do tipo de transferência metálica. Esta amplitude é especificamente chamada de corrente de transição (I_t), e é a mudança de patamar de corrente onde a frequência e modo de transferência metálica passa de globular para spray. Entre esse patamar, altas irregularidades no destacamento de gota ocorrem (WANG; HUANG; ZHANG, 2004). A representação gráfica da relação entre o modo de transferência e a intensidade de corrente pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 – Efeito da corrente de transição nas características de deposição e diâmetro de gota.

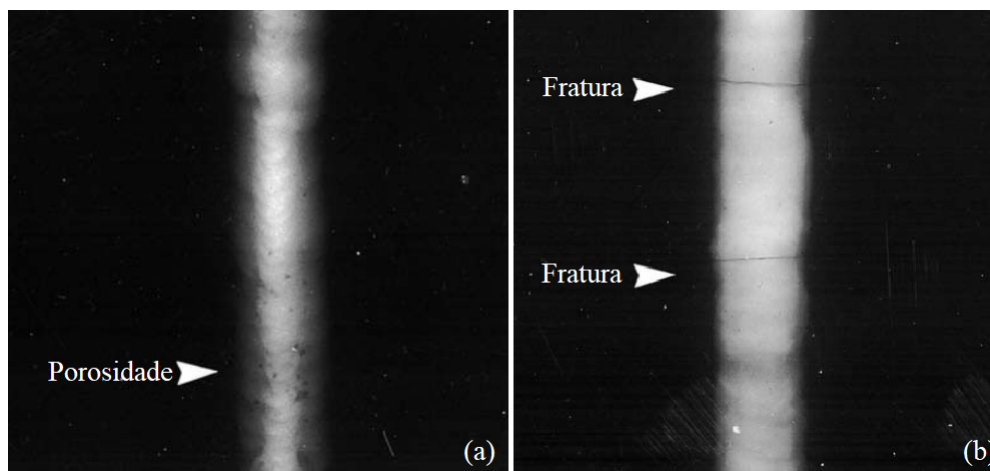


Fonte: Scotti e Ponomarev (2008).

A tensão de soldagem é relacionado ao comprimento do arco: com um comprimento de arco elevado, podem ocorrer desperdícios com respingos e cordão de solda irregular; já um arco curto pode resultar em cordões de solda mais estreitos e com baixa penetração. O comprimento de *stick-out* pode influenciar na quantidade de hidrogênio no metal de solda pois, quão menor for o comprimento de arame livre, não haverá tempo suficiente para que resíduos provenientes da atmosfera na região de solda sejam vaporizados, o que pode levar à inclusão de hidrogênio, oxidação, trincas e porosidades, resultados que podem ser compreendidos na Figura 13. Por fim, os gases de proteção possuem influência devido tanto à sua vazão quanto à sua composição. Quando são adicionados em uma vazão reduzida, o resultado pode ser de uma proteção insuficiente da poça de fusão, gerando porosidade e oxidação. Já uma vazão excessiva pode gerar turbulência no arco elétrico e mistura com o ar ambiente, com resultados similares aos observados em baixa vazão (DURAND, 2007).

Quanto à composição dos gases, a aplicação de gases ativos em processos com corrente

Figura 13 – Raio-X de cordões de solda exemplificando o surgimento de defeitos: (a) Porosidade; (b) Fratura.



Fonte: Adaptado de Jeffus e Bower (2010).

pulsada, como o CO_2 obteve avanços apenas a partir dos anos de 1980, já que para este tipo de transferência, os gases inertes apresentam reações indesejadas, especificamente a característica de transferência do tipo curto-circuito, passando para o modo globular com o aumento da corrente média de operação. Estudos indicam que este comportamento deve-se à tensão superficial significativamente menor e à forças não-axiais geradas pelo arco quando operando com CO_2 . Com o advento de fontes de soldagem capazes de gerar ondas quadradas de corrente otimizadas, foi possível atingir resultados satisfatórios com o uso de CO_2 , mas ainda com uma taxa de respingos superior à processos operando com Argônio (CUIURI; NORRISH; COOK, 2002).

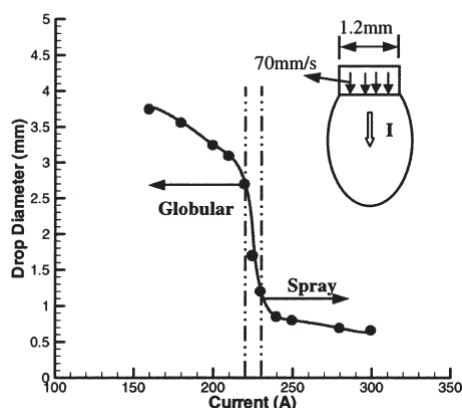
2.5.1 Seleção dos parâmetros de pulso

Como foi estabelecido na subseção 2.4.1, a condição de estabilidade para o processo pulsado é a de transferência de uma gota por pulso (ODPP). A partir de estudos de parametrização de processos GMAW realizados por Subramaniam et al. (1999) e expandidos para processos FCAW em pesquisas realizadas por Nogueira, Bohórquez e Zanella (2015) e Díaz, Acevedo e Cunha (2018), atualmente é possível garantir, mediante sequência de etapas, o modo de transferência metálica em processo pulsado e, com isso, atingir resultados de estabilidade do processo de maneira mais assertiva.

A primeira etapa está na seleção da amplitude da corrente de pico (I_p) que seja maior que a corrente de transição (I_t) para a condição de soldagem estudada. Isto é feito, quando disponível, via consulta de gráficos (similares ao apresentado na Figura 14) ou, como ocorre com mais frequência, pela realização de ensaios preliminares com corrente convencional. Desta forma, é possível identificar o valor da transição entre a transferência por curto-circuito para a goticular.

Tendo a corrente de transição conhecida, faz-se a relação entre a velocidade de alimen-

Figura 14 – Estimativa da relação entre a corrente e o diâmetro de gota.



Fonte: Wang, Huang e Zhang (2004).

tação do arame (V_a) com a corrente média (I_m) para determinar a constante de consumo " k ", por meio da Equação 2.5. Esta estimativa é inicialmente feita via a corrente média de transição observada nos ensaios preliminares. Como a corrente de pico deve ser maior que a corrente de transição, é possível fazer a variação da velocidade de alimentação de forma a encontrar uma condição de transferência estável.

$$V_a = k \times I_m. \quad (2.5)$$

A etapa seguinte é a definição do tempo de pulso via coeficiente de destacamento de gota " D ", definido pela Equação 2.6 em uma razão entre a corrente de pico (I_p) e o tempo de pico (t_p). Esta relação foi originalmente proposta por Quintino e Allum (1984) de forma experimental, sendo que a faixa de valores de corrente de pico e tempo de pico favoráveis à ocorrência de ODPP resulta em uma curva aproximadamente hiperbólica. O coeficiente " n ", por conta da aproximação hiperbólica, é usualmente atribuído como igual à 2, porém, autores (AMIN, 1983) atribuem um expoente igual à 2,3. A definição do tempo de pulso por meio do coeficiente " D " para uma transferência do tipo *spray* ocorre de maneira adequada para valores de corrente média inferiores à corrente de transição. Alguns valores experimentais podem ser observados na Tabela 4.

$$D = I_p^n \times t_p. \quad (2.6)$$

Nas circunstâncias onde a relação entre velocidade de alimentação e a frequência de pulsação é constante, esta relação será proporcional ao volume da gota que se destaca durante o pulso. Assim, espera-se que o volume da gota mantenha-se constante. Esta relação é estabelecida entre a velocidade de fusão e a corrente por meio da Equação 2.7.

$$w = \alpha' I + \beta_s I^2, \quad (2.7)$$

onde:

- w : Velocidade de fusão do arame [mm/s];
- α' e β : Coeficientes de contribuição do calor para a fusão do eletrodo [$m/s.A$] e [$s^{-1}.A^{-2}$];
- I : Corrente [A];
- s : Comprimento energizado do eletrodo [mm].

Como, no caso da corrente pulsada, a corrente possui variações no tempo, uma aproximação realizada por Quintino e Allum (1984) permite que a velocidade de fusão seja determinada pela Equação 2.8.

$$w \approx \alpha I_m + \beta \frac{(I_p^2 t_p)}{T}. \quad (2.8)$$

Tabela 4 – Valores experimentais de coeficiente de destacamento de gota.

Condições de Operação	D [$A^2.s$]	Coeficiente "n"	I_p [A]
Alumínio (Ar 100%) ^[1]	130,00	2,00	140
Aço Doce (Ar - 5% CO ₂) ^[1]	500,00	2,00	220
Arame de Alumínio 4043 ϕ 1,2 mm ^[2]	568,13	2,30	350
ER 5183 e ER5087 ^[3]	51,19	1,83	300
ER 5183 e ER5087 ^[3]	80,81	1,83	385

Fonte: ^[1]Allum (1986); ^[2]Dutra, Marques e Silva (2012); ^[3]Savi (2014).

Na sequência, é calculado o período da onda, necessária para obter-se um diâmetro de gota específico. Neste caso, são possíveis três configurações: diâmetro da gota menor que o diâmetro do eletrodo ($\phi_g < \phi_e$), diâmetro da gota igual ao diâmetro do eletrodo ($\phi_g = \phi_e$), e diâmetro da gota maior que o diâmetro do eletrodo ($\phi_g > \phi_e$). O período pode ser calculado pela Equação 2.9. Porém Vilarinho (2000) define o diâmetro de gota esférico como demonstrado pela Equação 2.10. Segundo estudos conduzidos pelo LABSOLDA - Instituto de Soldagem e Mecatrônica da Universidade Federal de Santa Catarina, o diâmetro da gota 20% maior que o diâmetro do eletrodo costuma atender satisfatoriamente a maioria das aplicações.

$$T = \frac{40 \times \phi_g^3}{V_a \times \phi_e^2}, \quad (2.9)$$

$$\phi_g = \sqrt[3]{1,5 \times T \times \phi_e^2 \times V_a}, \quad (2.10)$$

onde:

- T : Período [s];
- ϕ_g : diâmetro da gota [mm];
- ϕ_e : diâmetro do eletrodo [mm];

- V_a : Velocidade de alimentação [mm/min];

Por fim, é possível caracterizar o formato de onda pulsada obtendo o valor de tempo de base (Equação 2.4) e a corrente de base por meio da Equação 2.3. Para que a taxa de fusão do arame mantenha-se em equilíbrio com a velocidade de alimentação do arame, a corrente média deve-se manter constante durante o processo para que não ocorra distúrbios. Além disso, as amplitudes mínimas ($I_{p_{min}}$) e máximas ($I_{p_{max}}$) da corrente de pico estão relacionadas com os demais parâmetros de pulsação (período (T), corrente média (I_m), corrente de base (I_b) e tempo de base (t_b)) de acordo com as equações 2.11 e 2.12 (FILHO, 2017).

$$I_{p_{max}} = \frac{T}{t_p} \times I_m, \quad (2.11)$$

$$I_{p_{min}} = I_b = I_m. \quad (2.12)$$

2.5.2 Seleção do consumível

Para a seleção do consumível, além da sua relação com o metal de base, deve-se levar em conta sua performance econômica. Desta forma, é possível escolher dentre àquele consumível que possua uma maior taxa de deposição para a aplicação específica. Para além dos diversos fatores que podem influenciar um baixo desempenho econômico, é possível estimar inicialmente a performance econômica do consumível por meio das grandezas de taxa de fusão do arame, taxa de deposição e o rendimento do processo. A taxa de fusão do arame define a quantidade de consumível fundido por unidade de tempo. A taxa de deposição do arame quantifica a quantidade de material de adição foi fundida ao metal de base por unidade de tempo. Esta taxa de deposição procura levar em conta a quantidade desperdiçada por respingos. Por fim, o rendimento é a razão entre a taxa de deposição pela taxa de fusão. Para cada processo, as taxas possuem variações particulares que levam em conta o rendimento geral do processo. Para a soldagem FCAW, as taxas podem ser calculadas a partir das equações 2.13, 2.14 e 2.15,

$$T_F = 3,6 \times \frac{\rho_a L_a}{t}, \quad (2.13)$$

$$T_D = 3,6 \times \frac{(m_f - m_i)}{t}, \quad (2.14)$$

$$\eta = \frac{T_D}{T_F} \times 100\%, \quad (2.15)$$

onde:

- T_F : Taxa de fusão de arame [kg/h];
- T_D : Taxa de deposição de arame [kg/h];

- η : Rendimento [%];
- ρ_a : Densidade linear do arame [g/m];
- L_a : Comprimento de arame consumido [m];
- t : Tempo de processo [s];
- m_f : Massa final da junta após a soldagem [g];
- m_i : Massa inicial da junta antes da soldagem [g];

2.5.3 Seleção dos gases de proteção

Como foi visto anteriormente (seção 2.1), o processo FCAW tem a particularidade de fornecer à poça de fusão, nos casos dos consumíveis auto-protegidos, a própria proteção gasosa via queima de elementos contidos no fluxo do arame. O caso dos processos FCAW-S, entretanto, representam a exceção, sendo recomendação, tanto de fabricantes quanto de normas técnicas, que a utilização de atmosfera protetora seja feita para evitar defeitos de soldagem. A seleção da composição do gás de proteção no processo FCAW segue, portanto, a mesma lógica que é utilizada nos processos MIG/MAG. Deve-se levar em conta o metal de adição e de base, e as possíveis reações químicas que o gás utilizado terá, já que é sabido que ele afeta as propriedades mecânicas e o formato do cordão.

Espera-se que o gás de proteção utilizado mantenha o equilíbrio de sua influência sobre as seguintes características do processo, como aponta Moreira (2008):

- Potencial de ionização, que é a diferença de potencial necessária para remover um elétron de um átomo de gás, tornando-se um íon. Este fator influencia diretamente na estabilidade do arco, já que baixo potencial ionizante tornam o arco mais estável, já que seus átomos são facilmente transportados;
- Condutividade térmica, ou a capacidade de transferência de calor do arco para o metal de base. Quanto mais condutor térmico, mais temperatura será direcionado ao metal de base, afetando as propriedades mecânicas do cordão;
- Potencial de Oxidação, ou a capacidade que um gás tem de promover o processo de oxidação. Neste caso, a capacidade de oxidação promove alterações das propriedades do arco e do cordão final.

Na soldagem FCAW, é possível empregar gases com perfil ativo, inerte, ou ainda uma mistura percentual com ambos os gases. Quando emprega-se gases com perfil ativo, a intensão está em conferir alterações químicas na solda por meio da migração de elementos presentes nos gases para a microestrutura da solda, resultando em alterações no teor de carbono e óxidos com

o mais utilizado sendo o CO₂. Entretanto, este apresenta problemas relacionados à geração de respingos, oxidação e perda de performance em soldagem fora de posição (MOREIRA, 2008).

Já a utilização de gases inertes, a intensão é o oposto, ou seja, evitar a alteração microestrutural do cordão de solda via difusão de elementos químicos do gás. Nestes casos, os gases comercialmente mais utilizados são o Argônio e o Hélio. São notadamente utilizados pela suavidade de abertura e manutenção do arco porém, o fator econômico também possui peso na escolha, já que são mais caros que os gases ativos (MOREIRA, 2008).

O percentual de gases em uma mistura afeta no resultado com dependência do gás em maior teor na mistura. Quando os teores de dióxido de carbono ou de oxigênio são mais altos, ocorre menor transferência de elementos de liga do eletrodo para o cordão de solda, afetando as propriedades mecânicas do cordão. Já menores potenciais de oxidação resultam em redução da tensão do arco, resultando em menor potência e, por sua vez, menor penetração. Além disso, a misturam entre gases inertes e ativos, como o Argônio aliado à gases oxidantes ajudam a obter um arco estável e com bom potencial energético, atenuando problemas da aplicação pura de gases inertes ou ativos (MOREIRA, 2008).

2.5.4 Parâmetros secundários

Distância Bico de Contato à Peça

A distância DBCP possui relação direta com o calor gerado no processo, resultante do Efeito Joule, de forma que quão maior a distância definida, maior será a taxa de calor gerada por efeito Joule (Equação 2.16):

$$\dot{Q} = I^2 \times \Omega \times t, \quad (2.16)$$

onde:

- \dot{Q} : taxa de calor;
- I: corrente;
- Ω : resistência elétrica;
- t: intervalo de tempo de avaliação da corrente.

Caso a distância seja elevada, isso resultará em um comprimento de arco elevado e mais instável, resultante em baixa proteção da zona ionizada, respingos e cordão irregular; se a distância for muito curta, o arco também apresentará instabilidades;

Ângulo da tocha

Este é um parâmetro que influência no controle da escória no cordão depositado, define a direção na qual a força do arco é aplicado à poça de fusão e, por fim, dá formato ao cordão

e controla a penetração. É possível observar os ângulos de tocha e seus efeitos práticos nos exemplos da Figura 15. O ângulo é tomado no plano perpendicular à linha de realização do cordão de solda, sendo possível três condições: processo puxado ($\theta < 0$), processo empurrado ($\theta > 0$) ou soldagem reta ($\theta = 0$).

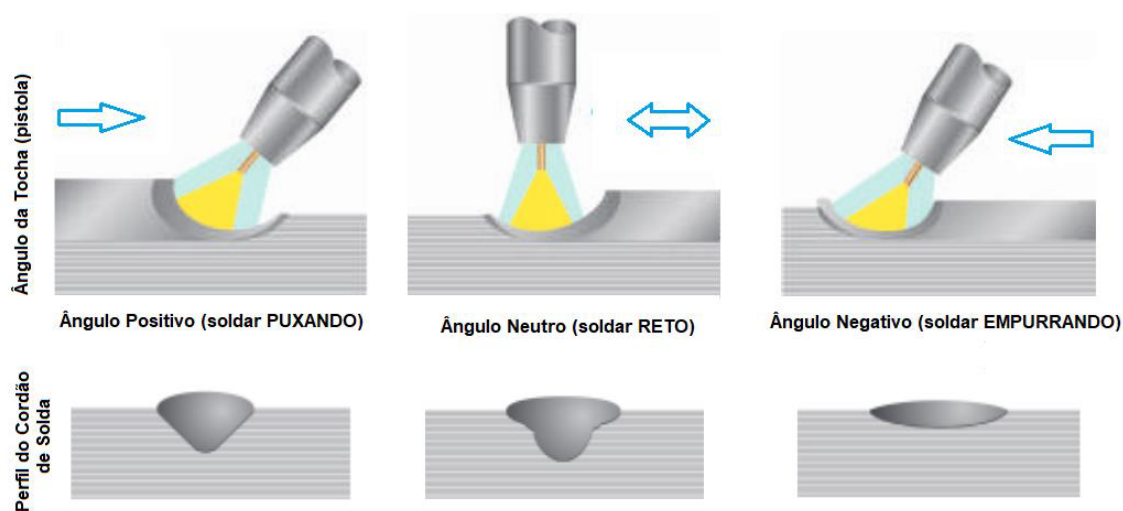
Velocidade de soldagem

É definida como o tempo necessário para a tocha de soldagem percorrer o comprimento total do cordão de solda. Se a velocidade for elevada, o perfil do cordão de solda será mais estreito e com menor penetração. Se a velocidade for reduzida, a penetração pode ser mais elevada e o cordão, mais largo. Entretanto, torna-se difícil o controle do calor gerado na região, causando uma ZTA mais elevada e, em casos de soldas em chapas finas, problemas de derretimento da chapa. Modenesi (2007) define a relação entre a área de seção transversal do cordão de solda como uma relação inversamente proporcional à velocidade de soldagem através da Equação 2.17:

$$A_d = \varphi \frac{A_w \times V_a}{\nu}, \quad (2.17)$$

onde A_d é a área de seção transversal do cordão de solda, A_w é a área de seção transversal do eletrodo, φ é a eficiência de deposição do processo, V_a é a velocidade de alimentação de arame, e ν é a velocidade de soldagem. Esta relação é comprovada em estudos feitos para diferentes tipos de processos de soldagem e pode ser visualizado no gráfico da Figura 16.

Figura 15 – Ângulos de tocha e efeitos no cordão de solda.

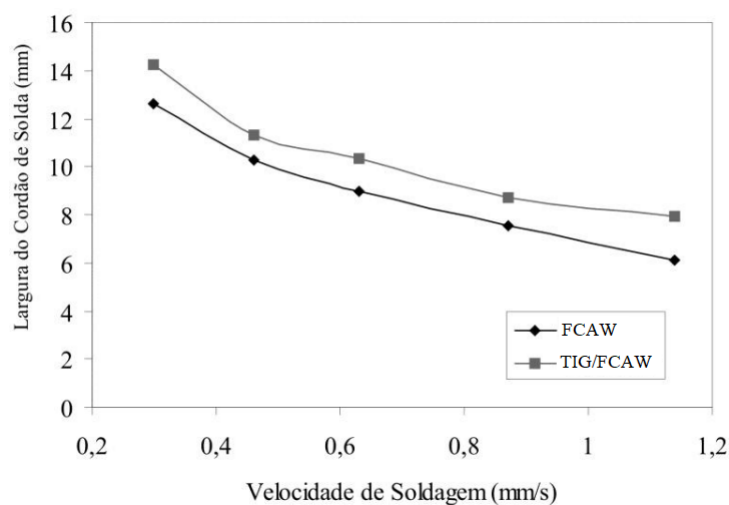


Fonte: Adaptado de GERDAU (2010).

2.6 Estabilidade do Processo e Métodos de Averiguação

Um processo de soldagem estável pode ser entendido como aquele que atende aos requisitos de qualidade estipulados em fase de projeto. Em termos da avaliação das características

Figura 16 – Largura do cordão de solda × Velocidade de soldagem para os processos FCAW e TIG/FCAW.



Fonte: Adaptado de Lermen (2011).

do resultado final, um cordão de solda homogêneo e sem respingos, com resultados de penetração e diluição à variarem dos resultados pretendidos: no caso de soldas de revestimento, com boa cobertura, baixa diluição e penetração; já para soldas de união, maior área de diluição e penetração.

Scotti e Ponomarev (2008) compreendem o processo estável como aquele que garanta tanto a estabilidade da transferência metálica (periodicidade e com baixo desperdício) quanto a manutenção do arco elétrico. Esta interpretação direciona o foco dos estudos para a adequada definição dos parâmetros de realização do processo, já que a estabilidade é uma consequência dos parâmetros definidos para a soldagem.

A qualidade do cordão de solda é diretamente dependente da correta parametrização do processo de acordo tanto com as especificações e limitações impostas pelos materiais de base e de adição, pelo resultado final pretendido e também por exigências de qualidade estabelecidas pelo cliente e por normas que regulamentam características do processo de soldagem. Portanto, quando se fala na estabilidade do processo de soldagem, a preocupação está no atendimento de padrões de qualidade estabelecidos previamente em fase de projeto.

A busca por um processo de soldagem de qualidade passa invariavelmente pelo empenho por um processo controlável, periódico e com a menor ocorrência de eventos anômalos possível. É comum que autores refiram-se à análise da estabilidade do processo de soldagem como a avaliação dos parâmetros e do fenômeno físico que governam a abertura e manutenção do arco elétrico. Isso tem fundamento pelo fato do arco elétrico ser a fonte calorífica fundamental da soldagem, tendo como funções básicas a fusão do metal de adição, o aquecimento localizado do metal de base e a proteção do metal transferido do ambiente externo. Desta forma, é possível qualificar a estabilidade do arco elétrico baseado nas premissas básicas de seu fenômeno: a

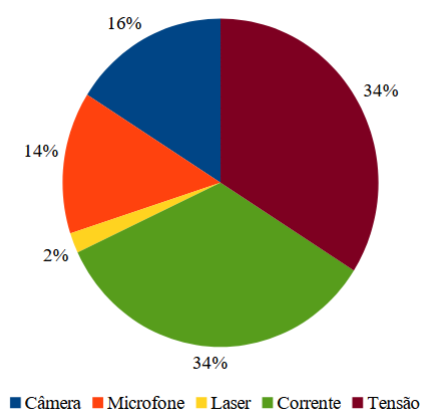
garantia da transferência de metal uniforme; a rápida re-ignição após curto-circuitos (quando for o caso); e pela avaliação da geometria do cordão e quantidade de respingos (MAZZAFERRO, 1998).

Esta interpretação deriva dos estudos de Essers e Van Gompel (1984), os quais afirmam que uma maneira efetiva de observar a estabilidade da soldagem é por meio da detecção dos instantes em que cada transferência ocorre. Durante a década de 1980, isso era possível apenas por meio da observação do comportamento dos oscilogramas de corrente e tensão instantâneos capturados, já que o fenômeno de destacamento de gota promove distúrbios característicos em ambos os sinais, sendo possível, assim, contabilizar a quantidade de transferências ocorridas.

É importante salientar, entretanto, que não existe um conceito global sobre quais são os pontos fundamentais que definem um processo estável, tampouco um método prático de avaliação. As abordagens na literatura divergem em pontos de análise e até entre processos de soldagem e ferramentas utilizadas. Em levantamento realizado por Alfaro e Puñales (2021), é possível verificar as principais linhas teóricas utilizadas por pesquisadores no processo de averiguação da estabilidade da soldagem: na Figura 17, verifica-se a prevalência de estudos voltados à análise de dados de corrente e tensão, devido à relativa facilidade em coleta e interpretação destes dados, apoiado pelos já conhecidos fenômenos físicos envolvidos no processo que manifestam-se de forma periódica nos valores temporais destes parâmetros.

Em relação às metodologias mais utilizadas para interpretação dos dados, há o preva-
lecimento das técnicas matemáticas e estatísticas para análise de dados numéricos (corrente e tensão sendo apenas alguns dos tipos de dados), como é possível observar na Figura 18. Demais técnicas, como a análise de frequências por FFT, inteligência artificial, lógica *Fuzzy* e superfície de resposta são vistas como alternativas de grande robustez analítica e que mostram sucesso em avaliar as diversas inter-relações paramétricas inerentes à soldagem, mas que ainda carecem de abrangência de suas aplicações em diferentes processos e condições de realização.

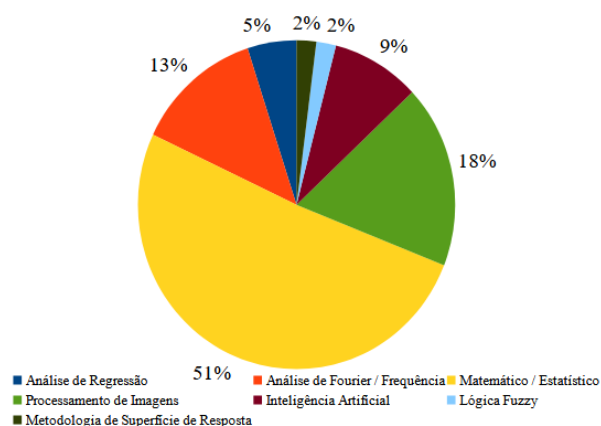
Figura 17 – Métodos de sensoriamento para captura de dados de soldagem.



Fonte: Alfaro e Puñales (2021).

A primeira avaliação de estabilidade realizada é a verificação dos aspectos visuais do

Figura 18 – Metodologias utilizadas para estimar a estabilidade na soldagem.



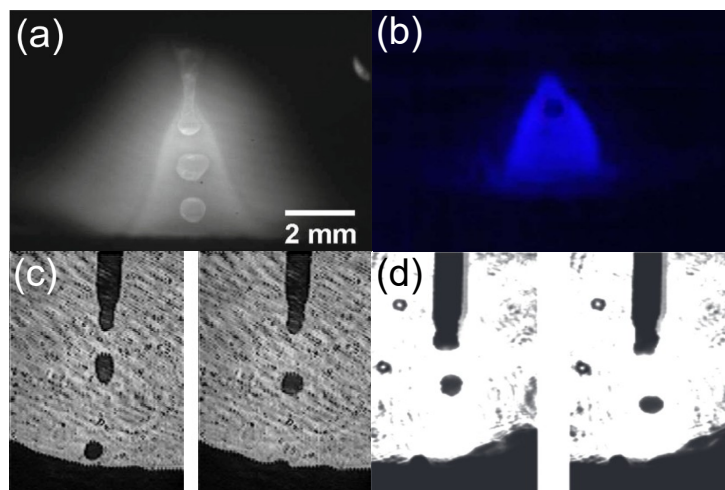
Fonte: Alfaro e Puñales (2021).

cordão de solda. Neste caso, tanto revestimentos quanto cordões de preenchimento passam por avaliações similares: uniformidade geométrica por toda sua extensão; presença de defeitos aparentes, como falta de preenchimento, mordedura ou trincas; ou presença de respingos. Ainda que não seja possível atribuir todos os defeitos de soldagem à instabilidade do processo, a ocorrência de defeitos serve de indicativo de que a soldagem não transcorreu idealmente. Defeitos como inclusão de escória, falta de penetração e porosidade, mesmo que possam ser atribuídas à instabilidade, não podem ser identificadas de maneira apenas visual, necessitando auxílio de métodos de verificação de defeitos, como inspeção por ultrassom e ensaios destrutivos.

Sendo a ocorrência do fenômeno de destacamento de gota um indicativo para a constatação e mensuração da regularidade do processo, uma das formas empregadas para constatar as características e regularidade deste fenômeno é por meio de sua observação. Esta, porém, é uma atividade que mostra-se relativamente trabalhosa por conta de fatores físicos impostos pelo próprio fenômeno, já que a região de abertura do arco é pequena (controlado pela distância de *stick-out*), e responsável por elevada emissão luminosa. A visualização do fenômeno só é possível, portanto, com a utilização de câmeras de alta taxa de captura de imagens (geralmente são utilizadas câmeras com taxa de 5.000 a 10.000 quadros por segundo), filtros ópticos e métodos computacionais para pós-processamento e filtragem das imagens. Através da aplicação da técnica mais apropriada, é possível observar fenômenos tais como: perfil geométrico do arco; periodicidade do destacamento de gota; fusão do metal de solda e de adição; solidificação do cordão; o comportamento físico do processo; formação de respingos, dentre outros, como pode ser visto na Figura 19.

Com isso, torna-se possível confirmar a relação dos parâmetros utilizados com o modo de transferência observado, além de possibilitar o cruzamento de informações visuais com demais sinais capturados do processo, como a tensão e a corrente. A Tabela 5 relaciona trabalhos e as principais técnicas de captura e processamento de imagens do processo de formação do arco e da transferência metálica.

Figura 19 – Transferência metálica em processo GMAW convencional (a); Frame capturado de uma transferência em processo GMAW (b); Transferência goticular capturada por shadowgrafia (c); Imagem filtrada de uma transferência goticular (d).



Fonte: Assunção et al. (2017)(a), Teixeira e Mazzaferro (2019)(b), Tereza et al. (2003)(c), Lopera, Alfaro e Motta (2012)(d).

Tabela 5 – Relação de artigos sobre visualização do arco elétrico.

Referência	Técnica Empregada	Parâmetro Avaliado	Processo
Bálsamo et al. (2000)	Shadowgrafia sincronizada	Transferência metálica	GMAW
Bae, Lee e Ahn (2002)	Câmera CCD, filtro ultra-red e densidade neural	Característica da poça de fusão	GMAW
Pinto et al. (2011)	Perfilografia	Transferência metálica	GMAW
Mota et al. (2013)	Diodos laser e sistema de infravermelho	Características do arco	GTAW – GMAW
Xu et al. (2015)	Câmera CCD, filtro dimmer	Características do arco	GTAW – GMAW
Hu et al. (2016)	Câmera CCD. Filtragem por luz de xenônio e lentes	Características do arco	GMT
Wang et al. (2016)	Filtro passa banda de 630 nm e filtro neutro	Frequência de deposição	GMAW
Silva et al. (2017)	Perfilografia	Característica da poça de fusão	GMAW
Steffens et al. (2019)	Perfilografia	Transferência metálica	FCAW
Cruz (2019)	Perfilografia	Transferência metálica	GMAW

Fonte: Autoria Própria.

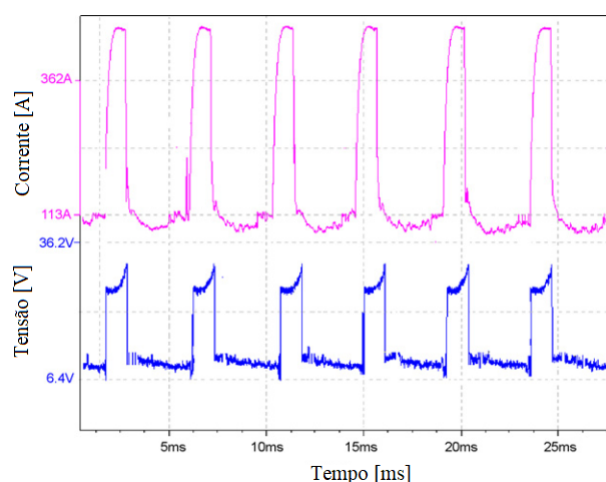
A avaliação dos dados coletados a partir dos processos de soldagem, especificamente os oscilogramas de corrente e tensão, servem de indicativo para compreender a ocorrência do processo de transferência metálica, bem como sua regularidade. Estes acabam servindo como um importante indicador da forma de transferência metálica, e suas variações, um indicativo da estabilidade (NEVES et al., 2021a).

Como exposto anteriormente, a corrente no processo pulsado é indutora do fenômeno de desprendimento de material, já que a corrente de pico gera energia suficiente para a fusão e

desprendimento do material, enquanto a corrente de base tem o papel de manter o arco aberto. A tensão, por outro lado, sofre de variações características com a instabilidade gerada pelo deslocamento de material pela região do arco elétrico. Por conta disso, estudos sobre a relação do fenômeno de desprendimento do material associados às oscilações nos sinais coletados de corrente e tensão são comumente empregados para comprovar a estabilidade do processo e a periodicidade do fenômeno (DUTRA, 1989; CORREA, 2018).

No processo pulsado, o método mais simples de verificação é por meio da sobreposição dos oscilogramas de corrente e tensão, como pode ser observado na Figura 20. Quando a transferência metálica ocorre, isso gera uma variação positiva no sinal de tensão simultânea ao período de corrente de pico, evidenciado por meio de picos característicos no sinal. Cada pico de tensão, comprovado este não sendo um pico insípiente, corresponde a uma gota transferida para a poça de fusão (como exposto na subseção 2.4.1, Figura 9). Esta análise, associada ao uso de ferramentas estatísticas – histogramas e desvio padrão do sinal de tensão – ajudam a quantificar a periodicidade do fenômeno (URIBE et al., 2017; FERREIRA et al., 2019).

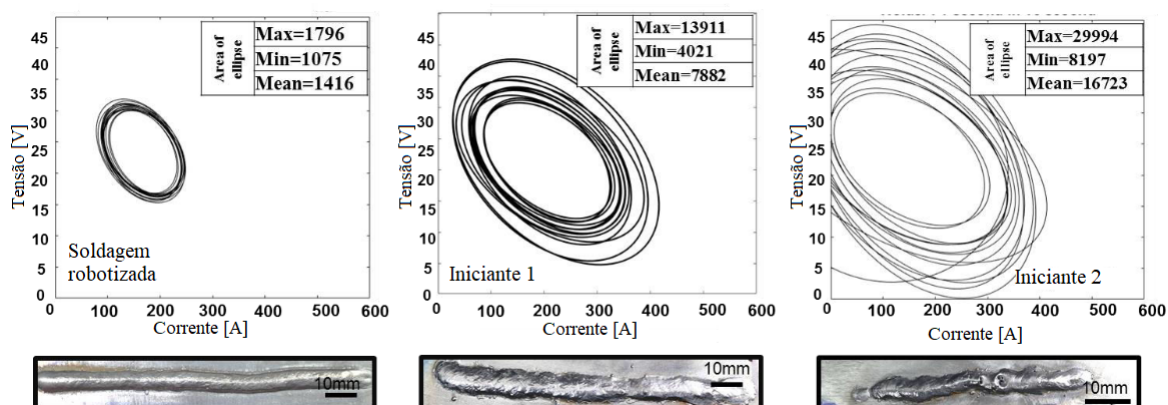
Figura 20 – Sobreposição dos oscilogramas de corrente e tensão.



Fonte: Ghosh et al. (2009).

Outra forma de avaliação da estabilidade do processo com uso dos dados de corrente e tensão é por meio do ciclograma de potência, ou diagrama Corrente \times Tensão. Este método gráfico é uma maneira visual de observar o comportamento macro do processo ao tornar a corrente em função da tensão, gerando um gráfico similar ao observado na Figura 21. Nesta avaliação, procura-se um padrão similar a uma forma geométrica fechada e sem pontos de dispersão e área reduzida (SUBAN; TŮSEK, 2003). A avaliação numérica deste método pode ser tomado a partir do cálculo da área gerada pelo ciclograma, tal como procedeu Kuoch, Warinsiriruk e Joy-A-Ka (2019) em sua análise: na Figura 21, é possível observar que, quão mais instável é o processo realizado, maior a área do ciclograma gerado.

Figura 21 – Comparação da área elíptica de ciclogramas gerados a partir de ensaios realizados em três condições de operação: soldagem robotizada, e por dois operadores iniciantes.



Fonte: Kuoch, Warinsiriruk e Joy-A-Ka (2019).

2.6.1 Critérios Quantitativos de Averiguação de Estabilidade

O critério LAPROSOLDA permite avaliar de forma sistêmica a influência de parâmetros inerentes ao processo GMAW no formato de transferência metálica por curto-circuito. Este critério foi desenvolvido por membros do Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem da Universidade Federal de Uberlândia (REZENDE et al., 2011).

Este critério tem por objetivo servir como ferramenta adicional na atividade de estimar o comportamento operacional do processo de soldagem, que até então baseava-se na verificação da regularidade dos elementos dos oscilogramas (corrente e tensão, majoritariamente). O critério baseia-se na premissa de que a estabilidade do processo está diretamente relacionada aos tempos dos fenômenos de curto-circuito e de arco aberto. Como resultado, foi definido o Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência por curto-circuito (IV_{cc}), definido pela Equação 2.18,

$$IV_{cc} = \frac{\sigma_{t_{cc}}}{t_{cc}} + \frac{\sigma_{t_{ab}}}{t_{ab}}, \quad (2.18)$$

onde t_{cc} e t_{ab} são os tempos médio de curto-circuito e de arco aberto, respectivamente, enquanto σ é o desvio padrão de ambos os tempos avaliados. Estabelecido o índice como sendo a razão entre o desvio padrão de uma variável pelo seu respectivo valor médio, espera-se de um processo estável valores reduzidos do desvio padrão. Portanto, quão próximo IV_{cc} estiver de zero, maior é a estabilidade do processo analisado.

É importante notar que o desenvolvimento inicial do índice IV_{cc} foi através da avaliação do fenômeno de desprendimento de material em formato curto-circuito. Porém, a avaliação realizada pelo índice baseia-se na regularidade com a qual o fenômeno ocorre durante o transcorrer do processo, sendo possível, desta forma, utilizar de seu princípio básico de análise para estudos em outros formatos de transferência. Na Tabela 6, é possível observar a relação de artigos que se debruçaram na pesquisa sobre o Índice Vilarinho.

Tabela 6 – Relação de artigos sobre o Índice Vilarinho de Regularidade.

Referência	Processo	Observação
Fernandes et al. (2010)	MIG/MAG	
Souza et al. (2011a)	MIG/MAG	
Souza et al. (2011b)	MIG/MAG	
Machado et al. (2013)	MIG/MAG	
Cordeiro (2017)	MIG/MAG	
Costa, Pereira e Paranhos (2019)	MIG/MAG	
Ferreira et al. (2019)	MIG/MAG	
Castellanos et al. (2021)	MIG/MAG	
Neves et al. (2021a)	FCAW	Corrente pulsada
Neves et al. (2021b)	FCAW	Corrente pulsada

Fonte: Autoria Própria.

Baseando-se nos requisitos principais para a manutenção do arco elétrico (transferência metálica e de carga elétrica uniforme), Farias (1993) define os seguintes critérios de avaliação de estabilidade do arco, todos partindo da avaliação dos valores instantâneos de tensão e corrente de soldagem:

- **Facilidade de transferência metálica:** avaliam a facilidade de ocorrência do fenômeno de curto-circuito (F_{cc}) e a facilidade de transferência da gota (F_{tm}). Ambos os parâmetros são definidos pelas equações 2.19 e 2.20.

$$F_{cc} = \frac{1}{T} \times 1000 \left(s^{-1} \right). \quad (2.19)$$

$$F_{tm} = \frac{1}{t_{cc}} \times 1000 \left(s^{-1} \right), \quad (2.20)$$

onde T é o período médio de transferência [ms] e t_{cc} é o tempo médio de curto-circuito [ms].

- **Regularidade de transferência metálica:** A regularidade de transferência é avaliada tendo por base o inverso do desvio padrão do período médio de transferência (σ_T) e do tempo médio de curto-circuito ($\sigma_{t_{cc}}$). A regularidade da ocorrência de curto-circuito (R_{cc}) e a regularidade de transferência da gota no curto-circuito (R_{tm}) são definidas pelas equações 2.21 e 2.22.

$$R_{cc} = \frac{T}{\sigma_T}. \quad (2.21)$$

$$R_{tm} = \frac{t_{cc}}{\sigma_{t_{cc}}}. \quad (2.22)$$

- **Facilidade de transferência de carga elétrica:** Este parâmetro (FE) é avaliado por meio da energia dissipada (E_1) para reabertura do arco após o curto-circuito. Portanto, nota-se que a mesma tem margem de aplicação limitada ao fenômeno de curto-circuito. Ambas estão definidas pelas equações 2.23 e 2.24, onde as potências no instante da reabertura do arco (P_1) e de referência (P_r) são obtidas via lei de Ohm.

$$E_1 = \frac{(P_1 - P_r) \times t_1}{2000} [J]. \quad (2.23)$$

$$FE = E_1^{-1}. \quad (2.24)$$

- **Regularidade de transferência de carga elétrica:** A regularidade de transferência de carga elétrica (RE) é definida pela relação entre a energia dissipada após o curto-circuito e o desvio padrão da energia dissipada após o curto-circuito, como é visto na Equação 2.25.

$$RE = \frac{E_1}{\sigma_{E_1}}. \quad (2.25)$$

Como é possível observar, a aplicabilidade das ferramentas listadas acima limita-se teoricamente ao modo de transferência por curto-circuito, porém sem impôr limitações quanto à natureza do processo. Na Tabela 7 é possível observar uma breve relação de artigos e estudos que utilizaram-se desta metodologia.

Tabela 7 – Relação de artigos sobre a verificação da estabilidade do processo via método de Farias (1993).

Referência	Processo	Observação
Rocha, Silva e Farias (2000)	SMAW	
Braga, Mota e Farias (2000)	FCAW	Convencional e Pulsado
Farias et al. (2002)	FCAW	Convencional e Pulsado
Sales (2002)	FCAW	Convencional e Pulsado
Rodríguez, Oria e Gómez (2016)	SMAW	

Fonte: Autoria Própria.

A metodologia mais utilizada para verificação da periodicidade do processo pulsado é a observação da quantidade de transferências metálicas em um período amostral. Devido a sua natureza de controle artificialmente imposto pela fonte de soldagem, irregularidades que são observadas nos oscilogramas de corrente e tensão são atribuídos inicialmente à curtos-circuitos do consumível com a poça de solda, fenômeno que decorre dos parâmetros de pulso e do tipo de gás utilizado. Tais instabilidades são estudadas a partir dos valores de desvio padrão da corrente e da tensão de soldagem (GHOSH, 2017).

A instabilidade na onda pulsada é arbitrariamente definida pelo desvio de valor de corrente de pico a 30 A a mais que a corrente de pico, valor definido como I_S . O grau de

instabilidade (I_{DC}) é estimado pela contagem de número de picos (N_{PA}) que passam acima do valor de I_S em um dado intervalo de 200 ms, tal como pode ser observado na Equação 2.26 e Equação 2.27,

$$I_{DC} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{PA}} I_{SP}}{N_{PA}}, \quad (2.26)$$

$$T_{IDC} = T_{NP2} - T_{NP1}, \quad (2.27)$$

onde:

- I_{DC} : Corrente desviada média;
- I_{SP} : Salto de corrente de pico acima de I_S por pico de instabilidade;
- T_{IDC} : Intervalo de tempo médio da corrente desviada;
- T_{NP} : Tempo inicial correspondente aos picos $N_{PA1,2}$.

2.7 Análise de Variância e Covariância

A análise de variância, ou ANOVA, refere-se a uma série de procedimentos estatísticos para análise de respostas quantitativas de unidades experimentais. A ferramenta busca investigar os fatores que podem influenciar significativamente, por meio da correta escolha de experimentos. Variações associadas à diferentes fatores são isoladas e estimadas por meio da divisão da variação total observada nos dados em componentes individuais que são atribuídos a vários fatores e aqueles devido à flutuações aleatórias, e a realização de teste de significância para determinar quais fatores influenciam o experimento. Quando aplica-se uma análise ANOVA simples, refere-se a análise de fator simples, simples classificação, ou por ANOVA *one-way* (HARDEO; MOHAMMED, 2000; DEVORE, 2011).

A análise ANOVA pode envolver dados amostrais a partir de mais de duas populações (ou distribuições) ou a partir de dados experimentais os quais mais que dois tratamentos foram usados. O que diferencia os tratamentos ou populações umas das outras são chamados de fatores em estudo, enquanto o que diferencia os tratamentos ou populações são chamados níveis de fatores (DEVORE, 2011).

Dada uma coleção " n " de observações y_i , a soma dos quadrados, também chamada de variação agregada, é definida por meio da Equação 2.28,

$$\sum_{i=1}^n \left(y_i - \underbrace{\frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}}_{\bar{y}} \right)^2. \quad (2.28)$$

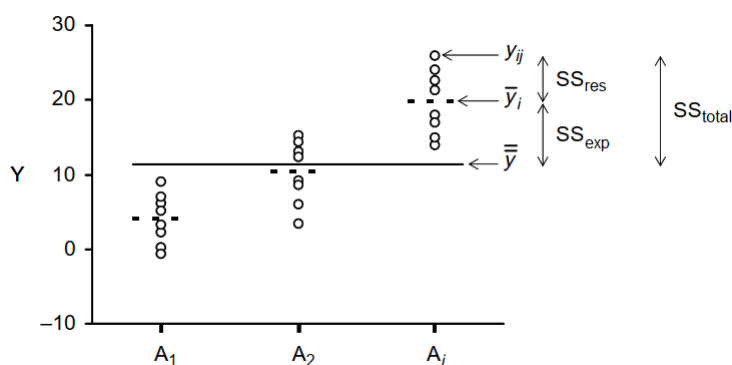
A partir da soma dos quadrados, a técnica aplicada realiza o particionamento destes valores em variações de componentes em função dos diferentes fatores. A quantidade total de

soma de quadrados (SS_T) é particionada então quantos forem as quantidades "k" de fatores, tal como mostra a Equação 2.29, onde cada parcela da soma representa a soma de quadrados associados para cada fator. Assim, o método consegue expressar o efeito individual de cada fator ou o efeito de um erro aleatório (HARDEO; MOHAMMED, 2000).

$$SS_T = SS_1 + SS_2 + \dots + SS_k. \tag{2.29}$$

A quantidade expressa pela soma total dos quadrados é chamada de soma explicada dos quadrados, ou SS_{exp} . A variação dos resíduos que permanecem inexplicadas (SS_{res}) pelo modelo é dado pela soma dos desvios dos quadrados de cada dado pontual (y_{ij}) de seu próprio grupo y_i , e é entendida como resíduo, erro, ou soma inexplicada de quadrados. Cada soma de quadrados possui uma quantidade de graus de liberdade (*d.f.*) à ele associado. Os graus de liberdade são as quantidades de partes de informações requeridas para mensurar o componente de variação, subtraída do número total de partes que contribuem para esta variação. O total de variações sempre possuem *d.f.*'s igual a um a menos que o número total de pontos de dados. Por exemplo: em um modelo de um fator (*one-way*) com "n" quantidade de observações em cada grupo "a" tem o total de *d.f.* = a - 1 (DONCASTER; DAVEY, 2007). Graficamente, os parâmetros discutidos podem ser compreendidos como demonstrado na Figura 22.

Figura 22 – Representação gráfica dos parâmetros da análise de variância de um conjunto de dados de: 8 observações para 3 grupos.



Fonte: Doncaster e Davey (2007).

A média quadrática (MS) é a razão entre cada SS por seu respectivo d.f., e representa a variação por grau de liberdade explicado para essa fonte. A componente explicada de variação é considerada contribuinte significativa para a variação total na resposta se esta possuir uma alta razão de sua MS para a MS da parcela residual. Esta razão é chamado de Fator-F da probabilidade de distribuição contínua da variável aleatória F. Ela é usada para determinar a probabilidade P de se obter um valor ao menos tão grande da razão observada das variâncias da amostra, dada uma verdadeira razão entre as variâncias igual à unidade (DONCASTER; DAVEY, 2007). O padrão utilizado em pesquisas das mais diversas áreas que envolvam análise de dados é considerar um limite de segurança para rejeição da hipótese nula de 5% (probabilidade $\alpha = 0,05$ de se cometer

erro em teste de hipótese do Tipo I). A apresentação dos dados na tabela ANOVA e as suas respectivas relações podem ser observadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Modelo generalizado de tabela ANOVA para testar um fator categórico, demonstrando as somas de quadrados explicado e residual, graus de liberdade e média quadrática, Fator-F e P-valor.

Componente de Variação	SS	d.f.	MS	Fator-F	P-valor
Explicado	$\sum_{i=1}^a n(y_i - \bar{y})^2$	$a - 1$	$SS_{exp}/d.f. \cdot exp$	MS_{exp}/MS_{res}	$< 0,05?$
Residual	$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$	$(n - 1)a$	$SS_{res}/d.f. \cdot res$		
Total	$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y})^2$	$na - 1$			

Doncaster e Davey (2007).

Para que a análise ANOVA seja executada e validada, são estabelecidos três pressupostos básicos:

- Amostras aleatórias e independentes;
- Populações com distribuição normal;
- Variâncias populacionais iguais.

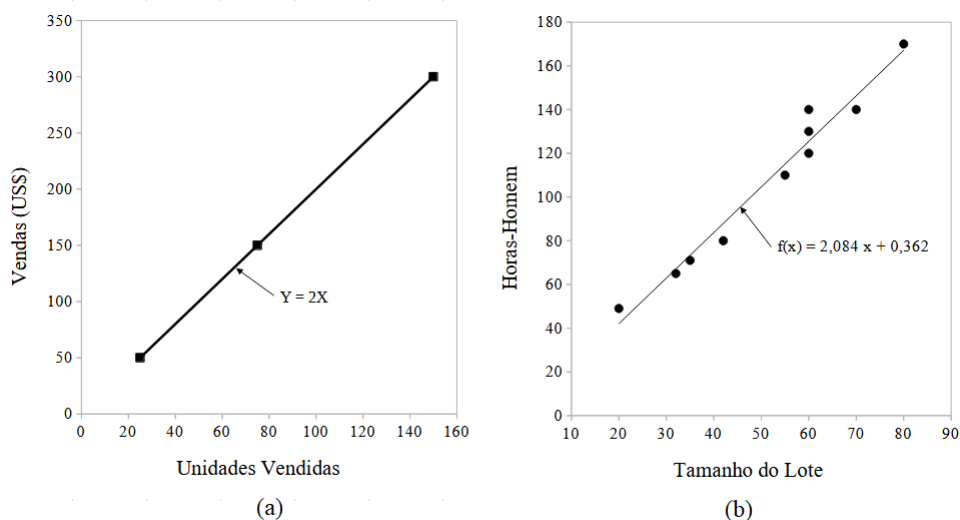
Porém, os resultados ainda são aceitáveis mesmo que as populações não sigam totalmente um modelo de distribuição normal (ou seja, não assimétricas). Nestes casos, o resultado pode ser validado se os valores de variância entre as populações forem próximos (MILONE, 2003). O teste de hipótese levantado pela ferramenta consideram os valores das médias populacionais, atribuindo as seguintes hipóteses nula e alternativa:

- Hipótese nula $H_0 =$ médias populacionais são iguais;
- Hipótese alternativa $H_1 =$ pelo menos uma das médias populacionais difere das demais avaliadas.

Além de testes que estabelecem a influência que fatores possuem em variáveis analisadas, pode ser de interesse em análise de dados e experimentos científicos estabelecer a tendência da relação linear entre um fator de resposta contínuo e um fator que varie de forma contínua em uma escala. Esta relação é chamada de covariância do fator contínuo "X" com "Y". Esta análise é conhecida como "análise de regressão", "análise de covariância", ou "ANCOVA", quando estiverem envolvidas ao menos um ou mais fatores categóricos (DONCASTER; DAVEY, 2007).

Neter, Wasserman e Kutner (1983) definem a análise de regressão como uma ferramenta estatística que utiliza a relação entre duas ou mais variáveis quantitativas para que uma variável possa ser predita por meio de outra, ou outras. As relações entre variáveis podem ser distinguidas entre funcionais e estatísticas. As relações funcionais são descritas por meio de formulação

Figura 23 – Exemplos gráficos de modelos de regressão linear: relação entre quantidade de produtos vendidos à preço fixo e arrecadação em dólares, demonstrando relação funcional (a); Relação entre tamanho do lote de produção de peças sobressalentes e o número de homens-hora de trabalho para 10 execução de produção realizados em condições de produção similares, demonstrando relação estatística.



Fonte: Adaptado de Neter, Wasserman e Kutner (1983).

matemática: sendo X uma variável independente, e Y uma variável dependente, a função que relaciona ambas é dado pelo formato $Y = f(X)$. Relações funcionais ajudam a expressar interações exatas e que possam ser expressas em modelos matemáticos. Por exemplo: uma situação de contrato de trabalho onde o empregado tem sua remuneração calculada a partir da quantidade de horas trabalhadas pode ser expressa em uma função do tipo $y = mx + b$, onde " x " representa o número de horas trabalhadas, " y " é o pagamento, " m " é o valor da hora trabalhada e " b " é o valor base para o empregado.

Por outro lado, relações estatísticas são inexatas e não encaixam-se diretamente em uma curva de relacionamento. Nestas circunstâncias, o estudo da distribuição do conjunto de dados analisados procura delinear a curva que melhor ajusta-se àquela distribuição. Em pesquisas científicas, relações estatísticas aproximam-se com reduzido erro relativo de relações funcionais já demonstradas teoricamente, porém assim são expressas devido a fatores externos não controláveis que causam desvios nas medições. Um hipotético estudo da variação da corrente de soldagem enquanto outros parâmetros sejam mantidos constantes, como a velocidade de soldagem e diâmetro do eletrodo, para que sejam investigados os efeitos na resistência à tração da junta soldada, levando à resultados que possam indicar ou não uma relação através do comportamento dos dados coletados. A diferença de comportamento entre relações numéricas e estatísticas podem ser compreendidas através da apresentação dos dados da Figura 23.

O modelo genérico de equação de regressão considera uma variável independente em

uma função de primeira ordem, equacionada na forma da Equação 2.30,

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \epsilon_i; \quad i = 1, 2, 3, \dots, \quad (2.30)$$

onde:

- Y_i : Valor da variável de resposta no i -ésimo ensaio;
- β_0 e β_1 : parâmetros;
- X_i : valor da variável independente no i -ésimo ensaio;
- ϵ_i : termo de erro aleatório com média $E(\epsilon_i) = 0$ e variância $\sigma^2(\epsilon_i) = \sigma^2$.¹

Dentre as principais considerações a serem feitas a respeito do modelo apresentado pela Equação 2.30, Neter, Wasserman e Kutner (1983) descrevem:

1. O valor de Y no i -ésimo ensaio é a soma de duas componentes: do termo constante $\beta_0 + \beta_1 X_i$ e do termo aleatório ϵ_i . Portanto, Y_i é uma variável aleatória;
2. Sendo $E(\epsilon_i) = 0$, e sendo propriedade do operador expectância $E(a + Y) = a + E(Y)$:

$$E(Y_i) = E(\underbrace{\beta_0 + \beta_1 X_i}_{\text{cte. a}} + \epsilon_i) = \underbrace{\beta_0 + \beta_1 X_i}_{\text{cte. a}} + E(\epsilon_i) = \underbrace{\beta_0 + \beta_1 X_i}_{\text{cte. a}}. \quad (2.31)$$

Desta forma, a resposta Y_i quando o nível de X existente no i -ésimo ensaio é X_i , vem de uma distribuição de probabilidade cuja média é dada por

$$E(Y_i) = \beta_0 + \beta_1 X_i. \quad (2.32)$$

Portanto, a função de regressão para a função 2.30 é dado pela Equação 2.33:

$$E(Y) = \beta_0 + \beta_1 X, \quad (2.33)$$

já que a função de regressão relaciona as médias das distribuições de probabilidade de Y para qualquer X dado ao nível de X .

3. O valor de Y observado no i -ésimo ensaio excede ou fica aquém do valor da função de regressão pelo valor do termo de erro ϵ_i ;
4. Assume-se o termo de erro ϵ_i tendo variância constante. Têm-se a partir disso que a variância da resposta Y_i é:

$$\sigma^2(Y_i) = \sigma^2. \quad (2.34)$$

Usando o teorema da variância que diz que $\sigma^2(a + Y) = \sigma^2(Y)$, temos que:

$$\sigma^2(\beta_0 + \beta_1 X_i + \epsilon_i) = \sigma^2(\epsilon_i) = \sigma^2. \quad (2.35)$$

¹O operador expectância é definido como o valor médio "esperado" em um experimento sendo repetido s -vezes. É definido pela série $E(Y) = \sum_{s=1}^k Y_s f(Y_s)$

5. Os termos de erro são assumidos como não correlacionados. Assim, o erro em algum ensaio não possui qualquer influência sobre o termo de erro de outro ensaio. Isso resulta em dizer que, sendo ϵ_i e ϵ_j não correlacionados, as respostas Y_i e Y_j também o serão.

Para estimar os parâmetros de regressão previamente expostos, o método mais empregado é o de mínimos quadrados. O método considera, para cada dado observado (X_i, Y_i) o desvio de Y_i do valor esperado da seguinte forma:

$$Y_i - (\beta_0 + \beta_1 X_i). \quad (2.36)$$

A aplicação do método requer que seja considerado a soma de "n" desvios quadráticos, critério denotado por "Q" e apresentado na Equação 2.37.

$$Q = \sum_{i=1}^n (Y_i - \beta_0 - \beta_1 X_i)^2. \quad (2.37)$$

De acordo com o critério dos mínimos quadrados, os estimadores de β_0 e β_1 são os valores b_0 e b_1 , respectivamente, que minimizam o critério "Q" para as observações da amostra dada (X_i, Y_i) . Os estimadores b_0 e b_1 , por sua vez, podem ser obtidos via método de tentativa e erro, mas também podem ser obtidos para qualquer conjunto de dados através das denominadas equações normais (Equação 2.38 e 2.39), enquanto b_0 e b_1 adotam a definição de estimadores pontuais de β_0 e β_1 .

$$b_1 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum (X_i - \bar{X})^2}, \quad (2.38)$$

$$b_0 = \frac{\sum Y_i - b_1 \sum X_i}{n} = \bar{Y} - b_1 \bar{X}. \quad (2.39)$$

Os resíduos (ϵ_i), ou seja, a diferença entre o valor observado Y_i para o correspondente valor ajustado \hat{Y} , são obtidos por meio da Equação 2.40. É importante que se faça a distinção entre o erro ϵ_i do erro residual. O primeiro faz referência ao desvio de Y_i para uma regressão linear de população não conhecida. O resíduo e_i , por sua vez, é o desvio vertical observado de Y_i da regressão linear ajustada (NETER; WASSERMAN; KUTNER, 1983).

$$\epsilon_i = Y_i - \hat{Y} = Y_i - b_0 - b_1 X_i. \quad (2.40)$$

Com os valores fornecidos pela análise de regressão, são produzidas relações de primeira ordem estimados por meio de método de mínimos quadrados. Com o amparo da análise ANOVA, é possível verificar de imediato quais os fatores que influenciam de maneira mais intensa na variáveis de resposta estudada. Esta verificação é realizada por meio do p-valor, o qual é aferido baseado a partir do nível de significância estabelecido na construção das hipóteses nula e alternativa (GUIMARÃES, 2020).

A análise da qualidade do modelo ajustado possui diferentes óticas (MINITAB, 2023). Pode-se verificar a qualidade do ajuste dentro dos limites de dados estudados, comparar entre

diferentes regressões, ou projetar o ajuste realizado para prever resultados fora dos limites de dados usados para o ajuste. Dentre os critérios usados para estudo da qualidade do ajuste, estão:

- S : desvio padrão da distância entre os valores dos dados e os ajustados, sendo medido em unidades da resposta, representando o quão longe os valores dos dados caem dos valores ajustados. Quão mais baixo for S , melhor o modelo tende a descrever a resposta;
- R^2 : representa percentualmente a variação na resposta que é explicada pelo modelo, sendo obtido a partir da razão da soma dos quadrados dos erros para a soma total dos quadrados. Quão mais próximo estiver à 100%, maior será o ajuste do modelo aos dados;
- R^2 (aj.): similar ao R^2 , mas com ajuste para variação no número de preditores em relação ao número de observações;
- PREQ: é a soma dos quadrados predito do erro, sendo a medida do desvio entre os valores ajustados e os valores observados. É útil para avaliar a capacidade de predição do modelo, onde quão menor o seu valor, melhor a capacidade de predição do modelo;
- R^2 (pred.): o R^2 predito é obtido a partir da remoção sistemática de cada observação do conjunto de dados, estimando assim a equação de regressão e determinando se o modelo faz uma boa predição da observação removida. Quão mais próximo o valor estiver de 100%, mais a probabilidade do modelo estimar novas observações;
- AICc: O critério de informação de Akaike Corrigido é utilizado para mensurar qualitativamente um modelo estatístico, com objetivo à simplicidade. Quão menor os valores de AICc, maior é a qualidade e simplicidade do modelo;
- BIC: O critério de informação Bayesiano é um critério de seleção de modelos que, assim como o AICc, aplica penalidade para adicionar termos ao modelo, reduzindo a tendência de sobreajuste do modelo aos dados amostrais. São preferidos os modelos com valores BIC reduzidos.

Ambas ferramentas ANOVA e ANCOVA são frequentemente utilizadas para averiguar relações e causas entre variáveis avaliadas. Em estudos de soldagem, seu emprego é comum em situações de estabelecimento de combinações ótimas de parâmetros, em condições de soldagem as quais as melhores combinações ainda não são conhecidas. Exemplos de emprego destas ferramentas em conjunto com outros métodos estatísticos no contexto da soldagem podem ser verificadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Relação de artigos sobre soldagem que utilizam ferramentas ANOVA e ANCOVA em diferentes circunstâncias.

Referência	Processo	Ferramentas Utilizadas	Análise Realizada
Anoop e Kumar (2013)	P-GTAW	Método de Taguchi ANOVA ANCOVA	Combinação paramétrica otimizada para soldas em liga AA7039
Manikandan et al. (2014)	P-GTAW	Método de Taguchi ANOVA	Análise da contribuição de cada fator na penetração em liga C-276
Zhang et al. (2018)	Soldagem Laser	ANCOVA	Correlação da frequência de aplicação do laser e resultados de penetração
Vedrtnam, Singh e Kumar (2018)	Arco Submerso	Superfície de Resposta ANCOVA Algoritmo genético	Otimização de parâmetros e quantificação da influência dos parâmetros no resultado final
Kumar e Omkumar (2021)	Soldagem ultrassônica	ANCOVA Superfície de Resposta	Otimização de parâmetros para soldagem de poliamida

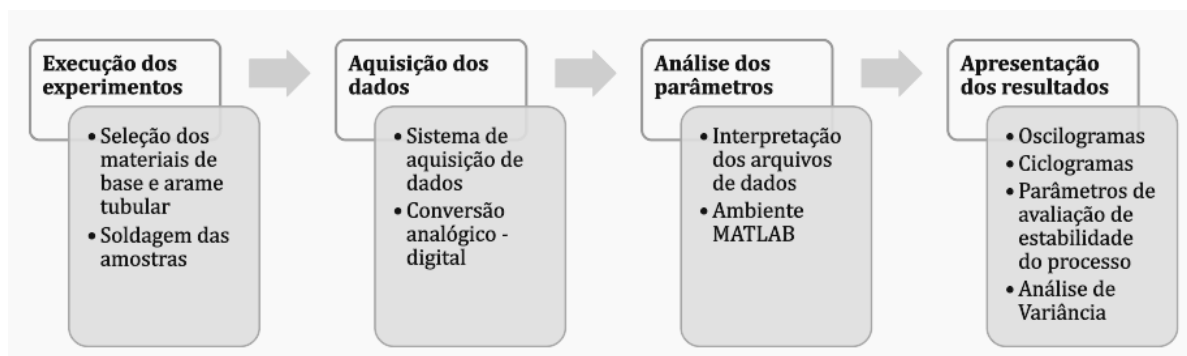
Fonte: Autoria Própria.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho possui duas etapas principais. A primeira é a pesquisa bibliográfica, com levantamento de estudos relacionados à investigação do fenômeno de estabilidade de soldagem P-FCAW, além de critérios e métodos que relacionem-se e colaborem para o embasamento dos resultados. A segunda é a pesquisa experimental, com realização de experimentos práticos, coleta de dados e análises relacionados à influência de determinados parâmetros de soldagem para o resultado final do cordão de revestimento.

Neste capítulo, portanto, serão descritos os procedimentos de realização dos experimentos, iniciando com a descrição dos materiais utilizados (metal de base e arame tubular); a montagem do ambiente de soldagem e materiais utilizados; a configuração do sistema de aquisição de dados; o método de definição da quantidade de ensaios e a seleção das amostras temporais de cada ensaio coletado. Para maior clareza dos tópicos expostos, a Figura 24 detalha o sequenciamento de atividades necessárias a serem executadas, bem como suas principais características.

Figura 24 – Sequenciamento das atividades para realização do estudo.



Fonte: Autoria Própria.

3.1 Metal de Base e Arame Tubular

Os corpos de prova utilizados foram chapas de aço SAE 1020 com dimensões de 185,0 x 63,5 x 12,7 mm, com resistência à tração média de 440 MPa e limite de escoamento médio de 330 MPa. A Tabela 10 apresenta o teor percentual dos elementos presentes nas barras. De forma a preparar a superfície do substrato para receber os revestimentos, os mesmos foram submetidos a um processo de jateamento abrasivo com granalha de aço angular G-25 S-280, com grau de dureza D, seguindo norma SAE J444 (SAE INTERNATIONAL, 2017).

O arame tubular utilizado foi o arame inoxidável martensítico AWS EC410NiMo com diâmetro de 1,2 mm, seguindo as especificações da norma ASME 2007, seção II, parte C. Suas características de composição química podem ser vistas na Tabela 11. O fornecedor apresenta

resultados médios de resistência à tração de 875 *MPa*, limite de escoamento superior à 800 *MPa* e alongamento de 19% em testes de 8 horas e temperatura de 580°C a 600°C (ESAB, 2006). Relacionado às propriedades de eficiência e taxa de deposição, o fabricante indica os valores da Tabela 12 para os respectivos valores de corrente média de soldagem.

Tabela 10 – Composição química das barras de aço SAE 1020 utilizadas.

C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Sn	N (PPM)
0,18/ 0,23	0,30/ 0,60	0,10/ 0,30	0,0030 máx	0,0030 máx	0,200 máx	0,150 máx	0,150 máx	0,060 máx	80

Fonte: GERDAU (2020).

Tabela 11 – Composição química do arame tubular EC410 NiMo.

C	Cr	Mn	Mo	Ni	Si
0,03%	12,00%	0,72%	0,58%	4,31%	0,60%

Fonte: ESAB (2006).

Tabela 12 – Eficiências estimadas para combinações de corrente média, tensão e taxa de deposição para o arame tubular EC410 NiMo 1,2 *mm* de diâmetro.

Corrente	Tensão	Taxa de Deposição	Eficiência
150 A	28 V	1,80 <i>kg/h</i>	92%
250 A	29 V	3,63 <i>kg/h</i>	93%
350 A	32 V	5,75 <i>kg/h</i>	94%

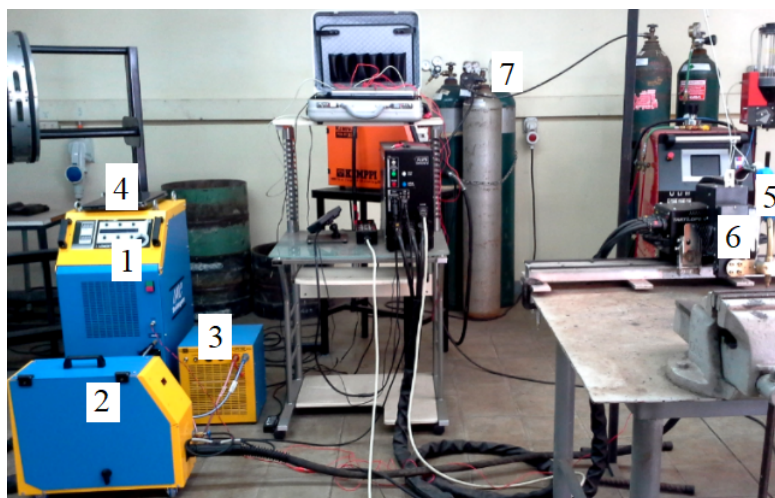
Fonte: ESAB (2006).

3.2 Ambiente de soldagem

O ambiente de realização dos ensaios de revestimentos, mostrado na Figura 25 é composto por: 1. Fonte de soldagem multi-processos; 2. Sistema de alimentação de arame; 3. Sistema de resfriamento da tocha; 4. Sistema de aquisição de dados; 5. Tocha de soldagem; 6. Sistema de movimentação transversal da tocha; 7. Cilindros de gases.

A fonte de soldagem utilizada é do tipo multi-processos eletrônica chaveada no secundário, com possibilidade de configuração do processo nos formatos convencional ou pulsado. As informações de formato de operação e dados técnicos podem ser melhor observados na Tabela 13. A tocha utilizada é um modelo reto refrigerado à água, TBI 511 AUT - 2,0 M, com diâmetro utilizável de 1,2 à 2,4 *mm*. O sistema que faz a movimentação da tocha é uma tartaruga de soldagem, modelo Tartílope V2, fornecida pela SPS - Sistemas e Processos. Possui liberdade

Figura 25 – Setup experimental dos ensaios (UTFPR campus Cornélio Procópio/PR).



Fonte: Adaptado de Correa (2018).

transversal e longitudinal, com velocidade de deslocamento de 160 cm/min e 300 cm/min , respectivamente.

Tabela 13 – Informações técnicas da fonte de soldagem.

Tipo	Fonte eletrônica chaveada no secundário
Modelo	Inversal 450
Fabricante	IMC Soldagem
Tipo de sinal	CC ou CA (constante ou pulsado)
Corrente Nominal	450 A
Tensão de entrada	220, 380 ou 440 V 3 ~
Tensão em vazio	68 V
Alimentação de arame	STA-20 / digital

Fonte: Adaptado de Correa (2018).

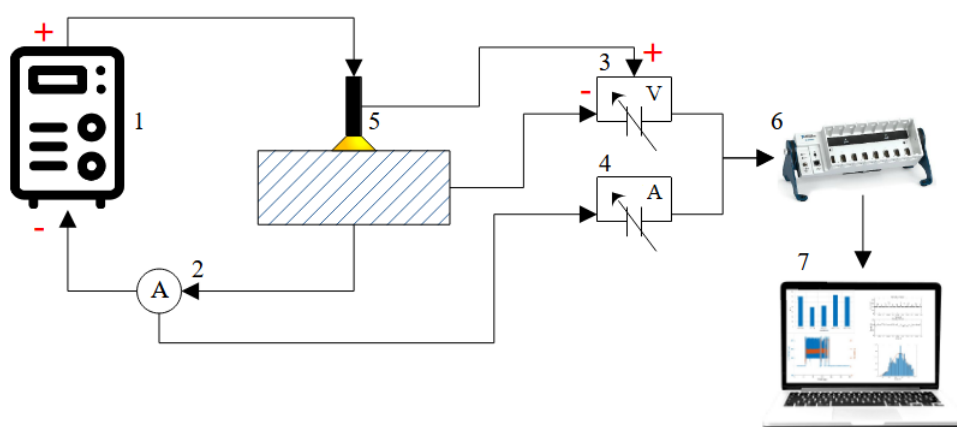
Para melhor fixar os corpos de prova na mesma posição, foi desenvolvido um dispositivo simples de posicionamento fixado na bancada de ensaios. Para que a vibração da tartaruga não interferisse na estabilidade do processo e coleta de dados, os corpos de prova foram acomodados em uma bancada independente, reduzindo assim o nível de vibrações na peça.

3.3 Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados é composto por: transdutores de corrente e tensão e um medidor de velocidade de alimentação de arame. Os transdutores utilizados são da fabricante SECON - Sensores e Instrumentos, modelos 600R010VAC-220VAC (transdutor de corrente) e 100V010VAC-220VAC (transdutor de tensão). O medidor de velocidade de alimentação do arame utilizado é do modelo MVA-1, da fabricante SPS - Sistemas e Processos. Os sistemas de aquisição de dados são conectados à um módulo de aquisição modelo cDAQ-9178, fabricante

National Instruments, sendo o módulo de saída analógica modelo NI 9205, configurado para obtenção de 100.000 pontos por amostra e taxa de aquisição de 25,6 kHz. A conversão dos dados digitais é feita via plataforma LabVIEW para arquivo ".lvm", que pode ser lido diretamente no software MATLAB. O esquema de conexão dos sensores seguiu o diagrama de blocos da Figura 26, onde os itens 1 e 5 representam a fonte e a tocha de soldagem, respectivamente. O item 2 é um sensor Hall de Corrente, os itens 3 e 4 são os transdutores de corrente e tensão, o item 6 o módulo de aquisição, e o item 7, o computador com a interface LabVIEW e MATLAB para interpretação dos dados.

Figura 26 – Diagrama de blocos simplificado do sistema de medição e aquisição de dados.



Fonte: Autoria Própria

3.4 Parametrização dos ensaios e avaliação dos resultados

Para a avaliação dos sinais de corrente e tensão em busca da relação entre os índices de estabilidade e os fenômenos de destacamento de gota, foram fixados alguns parâmetros de forma a reduzir a variabilidade de combinações de ensaios. Desta forma, foram mantidos constantes os parâmetros listados na Tabela 14.

As variáveis analisadas em sua influência foram a corrente média (I_m), a distância bico de contato peça (DBCP), a frequência de pulsação (f_p), e a velocidade de soldagem (ν). O planejamento experimental utilizado para a configurações das combinações paramétricas foi o método de Taguchi, que considera uma configuração matricial inicial $m \times n$, onde "m" é a quantidade de variáveis, e "n" é o número de níveis atribuídos a cada variável. O método atua de forma a obter uma resposta robusta, não susceptível a interferências de fatores ruidosos e de difícil controle. Assim, o problema é classificado em respostas objetivas em três níveis: quão menor, melhor (STB); nominal, melhor (NTB), e quão maior, melhor (LTB). Na situação de NTB, os valores são obtidos em duas etapas: encontrar a configuração de fatores que maximize a relação sinal-ruído (SN); e trazer a resposta média à meta alterando o fator de ajuste, mediante

fator com grande efeito na média, mas sem efeito na relação SN (PHADKE, 1989). A relação SN é definida de acordo com a Equação 3.1:

$$SN_{NTB} = 10 \log \frac{\bar{Y}}{S^2}, \quad (3.1)$$

onde \bar{Y} é a média amostral, e S^2 a variância da resposta observada. Já para os casos STB e LTB, os resultados são obtidos pela maximização das relações SN, definidas pela Equação 3.2 e Equação 3.3, respectivamente.

$$SN_{STB} = -10 \log n^{-1} \sum Y_i^2 \quad (3.2)$$

$$SN_{LTB} = -10 \log n^{-1} \sum Y_i^{-2} \quad (3.3)$$

A resultante são então 4 variáveis em 3 níveis (apresentados na Tabela 15), que combinadas resultam em uma matriz L9 de combinações otimizadas das variáveis, que podem ser conferidas na Tabela 16

De forma a evitar erros de medição relacionados à mau funcionamento dos instrumentos de medição, do sistema de instrumentação, precisão do equipamento, ou provenientes de outras fontes de erros, a sequência de realização dos ensaios foi aleatorizada por meio de planejamento de experimentos do *software* Minitab. A sequência de realização foi: 9, 4, 5, 3, 2, 7, 8, 1, 6.

Tabela 14 – Parâmetros de soldagem constantes nos ensaios.

Parâmetro	Nível
Polaridade do eletrodo	CCEP
Gás de proteção	Ar + 2% O ₂
Vazão de Gás	15 L/min
Ângulo da tocha (θ)	90°
Posição de soldagem	Plana
Temperatura de soldagem	150°C
Quantidade de cordões	1
Corrente de Pico (I_p)	350 A
Tempo de Pico (t_p)	8 ms

Fonte: Adaptado de Correa (2018).

3.4.1 Análise estatística dos resultados

Após a coleta dos dados dos ensaios nas condições das combinações de parâmetros apresentados na Tabela 16, empreende-se na etapa de análise dos dados. Tal etapa compreende a extração dos dados estatísticos dos sinais de corrente, tensão e potência: valores médio e desvio padrão, além de caracterização do sinal pulsado. Os índices a serem utilizados na análise dos ensaios, explorados de forma minuciosa na seção 2.6, serão avaliados a partir dos resultados

Tabela 15 – Variáveis de influência e os níveis avaliados.

Variáveis	-1	0	1
I_m [A]	170	200	230
DBCP [mm]	30	35	40
f_p [Hz]	23,26	26,32	30,30
ν [mm/min]	300	350	400

Fonte: Correa (2018).

Tabela 16 – Combinação de parâmetros para realização dos ensaios.

Nº	I_m [A]	f_p [Hz]	ν [mm/min]	DBCP [mm]	I_p [A]	t_p [ms]	t_b [ms]	I_b [A]
1	170	23,26	300	30	350	8	35	129
2	170	26,32	350	35	350	8	30	122
3	170	30,30	400	40	350	8	25	113
4	200	23,26	350	40	350	8	35	166
5	200	26,32	400	30	350	8	30	160
6	200	30,30	300	35	350	8	25	152
7	230	23,26	400	35	350	8	35	203
8	230	26,32	300	40	350	8	30	198
9	230	30,30	350	30	350	8	25	192

Fonte: Autoria Própria.

médios tomados a partir das amostras de cada ensaio, com subsequente validação a partir de análise estatística perante resultados morfológicos e análise ANOVA.

Para que a análise dos ciclogramas das amostras se torne quantitativa, os mesmos foram submetidos a processamento de imagem para obtenção da área dos ciclogramas, em *pixels*. Para tal, os ciclogramas foram gerados com escala dos eixos "x" e "y" fixas, mantendo apenas a imagem do ciclograma. A imagem, salva com dimensão de 420x560 *pixels*, é então processada utilizando a ferramenta *Image Segmenter*, que promove o refino de regiões de figuras por meio de algoritmos automáticos. Neste caso, foi utilizado a máscara "*Flood Fill*" com tolerância de 0,05 para que a região externa ao ciclograma fosse destacada. A imagem processada é então salva em formato binário para que a área de interesse fosse então obtida utilizando a ferramenta "*Image Region Analyser*".

Todas as análise de regressão realizadas foram parametrizadas em acordo com estudos estatísticos similares realizados por Correa (2018), Guimarães (2020), Ferreira (2022), onde:

- Interações até a ordem: 2;
- Termos até a ordem: 2;
- Nível de confiança para os intervalos: 95% ($\alpha = 0,05$);
- Tipo de intervalo de confiança: Bilateral;

- Soma dos quadrados para teste: Ajustado (Tipo III).

Na análise de variância para as interações entre "Y" e as variáveis categóricas X_i , o teste de hipótese adotado é o apresentado na Equação 3.4.

$$\begin{cases} H_0 : Y \text{ possui relação estatística com } X_i \\ H_1 : Y \text{ possui relação estatística insignificante com } X_i \end{cases} \quad (3.4)$$

Na verificação do comportamento do sinal de corrente parametrizado, é utilizado o teste-t para 1 amostra com o intuito de comparar a média amostral com o valor de referência, que neste caso é o parametrizado na fonte de soldagem. O teste de hipótese desta ferramenta é o apresentado na Equação 3.5, onde \bar{x} o valor regulado na fonte. Nesta análise, também é utilizado nível de confiança de 95%, ou $\alpha = 0,05$.

$$\begin{cases} H_0 : \mu = \bar{x} \\ H_1 : \mu \neq \bar{x} \end{cases} \quad (3.5)$$

A análise de correlações entre duas variáveis é feita através da interpretação de matriz de correlações, construída a partir dos índices de correlação de Pearson (ρ), calculados a partir da Equação 3.6, onde x e y são os valores medidos de ambas as variáveis, e \bar{x} e \bar{y} , as médias aritméticas.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3.6)$$

O índice ρ possui domínio entre -1 e 1, com o sinal indicando o sentido da correlação: negativo para correlações inversamente proporcional; positivo para correlações diretamente proporcionais. A interpretação dos valores segue a indicação fornecida por Hinkle, Wiersma e Jurs (2003), onde:

- $\rho > 0,90$: Correlação muito forte;
- $0,90 > \rho > 0,70$: Correlação forte;
- $0,70 > \rho > 0,50$: Correlação moderada;
- $0,50 > \rho > 0,30$: Correlação fraca;
- $\rho < 0,30$: Correlação irrelevante.

A validação dos modelos de regressão dos sinais elétricos e dos índices de estabilidade estudados será feita: através da avaliação dos critérios de qualidade de ajuste (S, R^2 ajustado e predito, PREQ, AICc e BIC); pelos resultados das análises de variância; e pelo estudo de correlações entre parâmetros com os resultados de morfologia. Ao final da exposição dos resultados, espera-se ser possível definir os modelos mais confiáveis para a tarefa de verificação da regularidade, periodicidade e estabilidade de processos FCAW operando em corrente pulsada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram organizados em três etapas: primeiro, foram apresentados e discutidos os resultados morfológicos, incluindo análise estatística. Em seguida, os sinais elétricos (corrente, tensão e potência) foram amostrados e analisados, considerando comportamento médio, desvio padrão e construção de modelos de regressão. Por fim, foram extraídos índices de estabilidade dos ensaios, avaliados através de estudo estatístico e comparação com resultados elétricos, morfologia e literatura existente.

4.1 Morfologia do Cordão de Solda

De forma a recordar o que fora dito na seção 2.2, espera-se de cordões de revestimento: maior largura, baixo reforço, e índice de convexidade (IC) próximo à referência de 30% adotada por Nascimento e Pukasiewicz (2016). Como o foco do presente estudo são os resultados numéricos baseados nos sinais de corrente e tensão, a morfologia dos cordões não serão analisadas de maneira aprofundada. Tais análises foram melhor detalhadas por Moreno (2017) em estudos da estrutura cristalina dos cordões e ZTA, e Guimarães (2020) com o estabelecimento de relações de regressão entre morfologia e parâmetros de soldagem. Neste trabalho, estes resultados tem por finalidade servirem como uma forma de validação dos índices utilizados para mensurar a estabilidade do processo.

Estão reunidos na Tabela 17 os resultados de largura, reforço, e índice de convexidade (IC) dos cordões de revestimento por ensaio. Por sua vez, na Figura 28 é exibido a geometria ilustrativa (medição média) dos cordões realizados, sendo as medidas tomadas a partir de amostras de seção transversal dos cordões embutidos (três embutimentos podem ser observados na Figura 27). Analisando o comportamento da largura, o maior valor obtido foi de 11,49 *mm* com a parametrização do ensaio 8. Por sua vez, o menor valor foi de 8,03 *mm* no ensaio 2. Avaliando os efeitos principais dos parâmetros no comportamento médio da largura (gráfico da Figura 29), nota-se uma relação diretamente proporcional entre a largura e a corrente média. Este comportamento era esperado, haja vista que o aumento de corrente implica em maior taxa de calor no processo e, conseqüentemente, maior deposição de material na poça de fusão. A dependência da largura com a variação da DBCP também é notável e já teve sua influência notada por Filho (2017), onde o aumento desta distância provoca conseqüente aumento na distância para abertura de arco (comprimento de *stick-out*), fazendo com que a gota tenha de percorrer maior distância até chegar a poça de fusão, provocando menor diluição e maior largura do cordão.

Já na avaliação do comportamento dos reforços das amostras, o maior valor observado foi de 4,55 *mm* na parametrização do ensaio 1, enquanto o menor reforço foi de 3,30 *mm* com parâmetros do ensaio 5. Vale destacar o efeito que a mudança nos parâmetros de corrente média e velocidade de soldagem exerceram, com os menores valores de reforço obtidos à $I_m = 230 A$

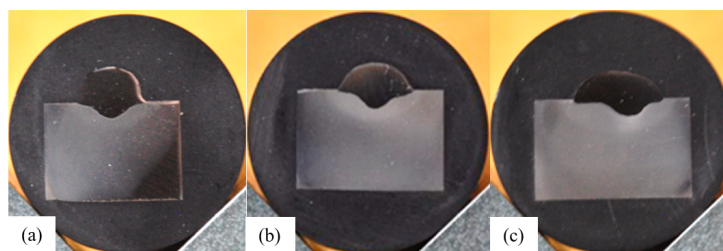
Tabela 17 – Resultados das morfologias de cordão obtidos a partir dos ensaios.

Ensaio	Parâmetros de Ensaio	Resultados Obtidos		
		Largura [mm]	Reforço [mm]	IC [%]
1	$I_m = 170 A$ $f_p = 23,26 Hz$ $\nu = 300 mm/min$ DBCP = 30 mm	8,69	4,55	52,42
2	$I_m = 170 A$ $f_p = 26,32 Hz$ $\nu = 350 mm/min$ DBCP = 35 mm	8,03	4,16	51,79
3	$I_m = 170 A$ $f_p = 30,30 Hz$ $\nu = 400 mm/min$ DBCP = 40 mm	9,05	3,33	36,75
4	$I_m = 200 A$ $f_p = 23,26 Hz$ $\nu = 350 mm/min$ DBCP = 40 mm	10,17	3,68	36,75
5	$I_m = 200 A$ $f_p = 26,32 Hz$ $\nu = 400 mm/min$ DBCP = 30 mm	9,72	3,30	33,90
6	$I_m = 200 A$ $f_p = 30,30 Hz$ $\nu = 300 mm/min$ DBCP = 35 mm	10,87	4,10	37,75
7	$I_m = 230 A$ $f_p = 23,26 Hz$ $\nu = 400 mm/min$ DBCP = 35 mm	9,90	3,33	33,69
8	$I_m = 230 A$ $f_p = 26,32 Hz$ $\nu = 300 mm/min$ DBCP = 40 mm	11,49	3,51	30,52
9	$I_m = 230 A$ $f_p = 30,30 Hz$ $\nu = 350 mm/min$ DBCP = 30 mm	10,10	3,59	35,51

Fonte: Guimarães (2020).

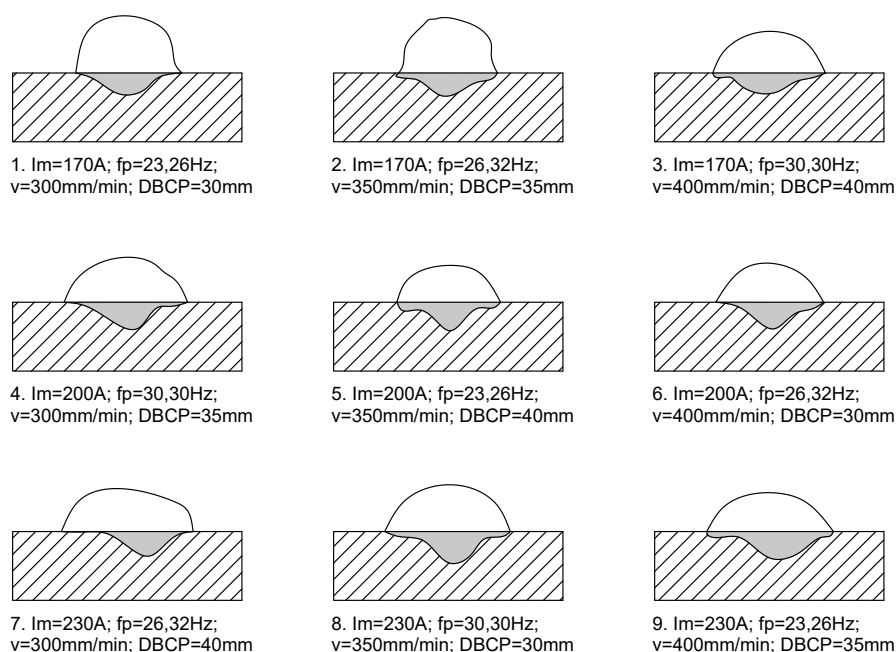
e $\nu = 400 mm/min$, como pode ser observado no gráfico de efeitos principais da Figura 29. Em termos de correlação, é perceptível o efeito que a corrente exerce sobre a redução nos valores de reforço. Entretanto, tal relação é afetada por influência dos demais parâmetros, haja vista que a variabilidade na altura do reforço não é notável quando comparado entre ensaios. Filho (2012) nota que, ainda que a variação da DBCP não tenha provocado alterações substanciais neste parâmetro em seus estudos, ainda chama atenção para o fato de haver mudanças proporcionais

Figura 27 – Seções transversais de cordões embutidos para processo de medição: (a) ensaio 1; (b) ensaio 6; (c) ensaio 9.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 28 – Ilustração dos resultados morfológicos dos cordões.



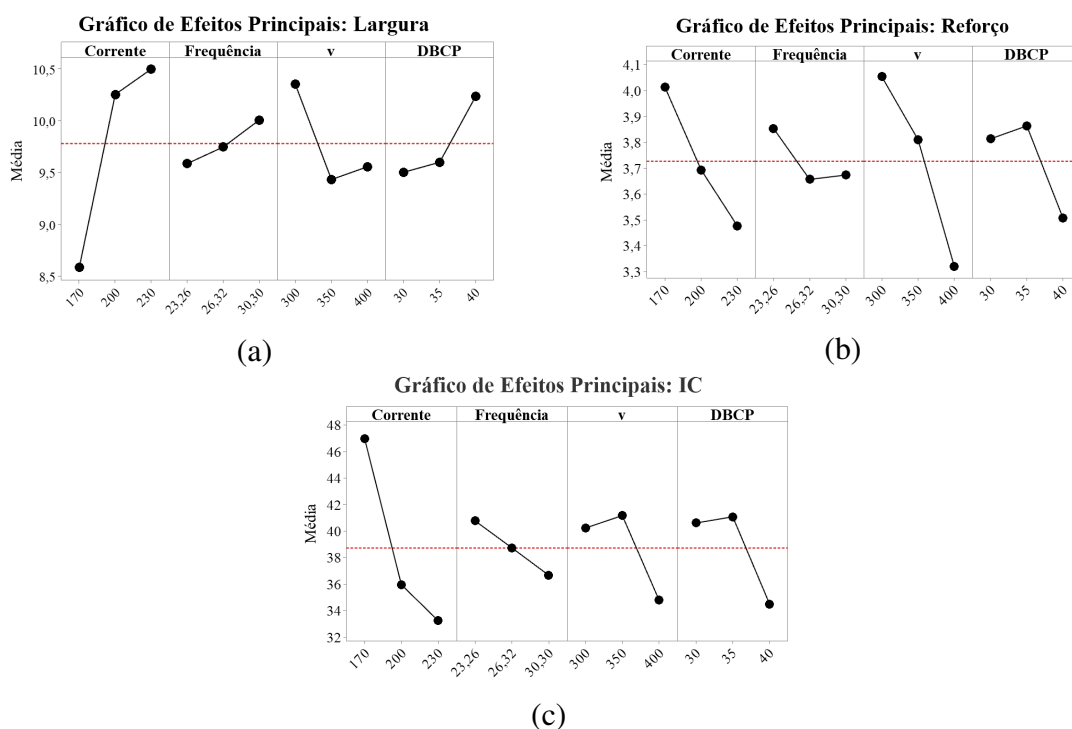
Fonte: Adaptado de Guimarães (2020).

no reforço com a mudança da DBCP, muito devido ao aumento ou diminuição na distância de *stick-out*, que funciona como resistência elétrica adicional ao circuito de soldagem.

A variação do índice de convexidade tem a tendência de comportar-se tal qual a variável de reforço do cordão, sendo uma grandeza inversamente proporcional à variação de todos os parâmetros, com especial destaque à corrente média. A variação do índice de convexidade comportou-se tal qual à resposta dos valores de reforço, com destaque para o patamar entre os valores médios entre os ensaios operando com corrente média de 170 A e 200 A, salto similar, mas em sentido oposto, observado na resposta dos valores de largura, o que é esperado, já que IC é inversamente proporcional à variação da largura. O menor IC obtido foi de 30,52% no ensaio 8, enquanto o maior IC foi de 52,42% no ensaio 1.

Analisando os resultados das ANOVAs para os parâmetros de morfologia de cordão

Figura 29 – Gráfico de efeitos principais para os parâmetros de morfologia.



Fonte: Adaptado de Guimarães (2020).

(largura na Tabela 18, reforço na Tabela 19, e IC na Tabela 20), constata-se a rejeição da hipótese nula para todas as equações resultantes. Os p-valores resultantes foram resumidamente expostos na Tabela 21. Ao analisar o sumário dos modelos de regressão (Tabela 22), constata-se o bom ajuste dos modelos a partir da análise dos valores de R^2 , todos acima dos 80%. Os resultados de R^2 predito indicam confiabilidade para o uso de tais modelos para previsão de resposta para futuras observações, tal como pode comprovar Guimarães (2020) aplicando otimização de parâmetros utilizando as equações de regressão resultantes a partir dos dados dos ensaios (equações 4.1, 4.2, e Equação 4.3).

Tabela 18 – Resultados da ANOVA para a equação de regressão da variável Largura.

Fonte	GL	SQ Seq.	Contr.	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Fator F	P-valor
Regressão	4	14,417	74,86%	14,417	3,604	9,68	0,001
I_p	1	10,868	56,43%	10,868	10,868	29,18	0,000
f_p	1	0,055	0,29%	0,055	0,055	0,15	0,706
ν	1	1,880	9,76%	1,880	1,880	5,05	0,043
DBCP	1	1,613	8,38%	1,613	1,613	4,33	0,058
Erro	13	4,842	25,14%	4,842	0,373		
Falta de ajuste	4	3,890	20,20%	3,890	0,973	9,19	0,003
Erro puro	9	0,952	4,94%	0,952	0,106	—	—
Total	17	19,259	100,00%				

Fonte: Adaptado de Guimarães (2020).

Tabela 19 – Resultados da ANOVA para a equação de regressão da variável Reforço.

Fonte	GL	SQ Seq.	Contr.	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Fator F	P-valor
Regressão	4	2,882	86,27%	2,882	0,721	20,42	0,000
I_p	1	0,854	25,86%	0,864	0,864	24,49	0,000
f_p	1	0,115	3,45%	0,115	0,115	3,26	0,094
ν	1	1,621	48,51%	1,621	1,621	45,93	0,000
DBCP	1	0,585	8,99%	0,564	0,564	29,88	0,014
Erro	13	0,459	13,73%	0,459	0,035		
Falta de ajuste	4	0,272	8,15%	0,272	0,068	3,29	0,064
Erro puro	9	0,187	5,58%	0,187	0,021	—	—
Total	17	3,341	100,00%				

Fonte: Adaptado de Guimarães (2020).

Tabela 20 – Resultados da ANOVA para a equação de regressão da variável Índice de Convexidade.

Fonte	GL	SQ Seq.	Contr.	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Fator F	P-valor
Regressão	4	778,620	76,76%	778,620	194,656	10,73	0,000
I_p	1	567,090	55,91%	567,090	567,091	31,27	0,000
f_p	1	10,060	0,99%	10,060	10,061	0,55	0,470
ν	1	89,100	8,78%	89,100	89,102	4,91	0,045
DBCP	1	112,370	11,08%	112,370	112,369	6,20	0,027
Erro	13	235,730	23,24%	235,730	18,133		
Falta de ajuste	4	213,240	21,02%	213,240	53,309	21,33	0,000
Erro puro	9	22,500	2,22%	22,500	2,500	—	—
Total	17	1014,360	100,00%				

Fonte: Adaptado de Guimarães (2020).

Tabela 21 – Resumo das ANOVAs, com os p-valores resultantes para Largura, Reforço e Índice de Convexidade.

	Largura	Reforço	IC
I_p	0,000	0,000	0,000
f_p	0,706	0,094	0,470
ν	0,043	0,000	0,045
DBCP	0,058	0,014	0,027

Fonte: Adaptado de Guimarães (2020).

$$L = 1,49 + 0,03172I_m + 0,03172f_p - 0,00792\nu + 0,1222DBCP \quad (4.1)$$

$$R = 10,748 - 0,00894I_m - 0,0484f_p - 0,00735\nu - 0,0511DBCP \quad (4.2)$$

$$IC = 146,4 - 0,2291I_m - 0,453f_p - 0,0545\nu - 1,020DBCP \quad (4.3)$$

A Figura 30 apresentam os gráficos de probabilidade normal dos resíduos das respostas,

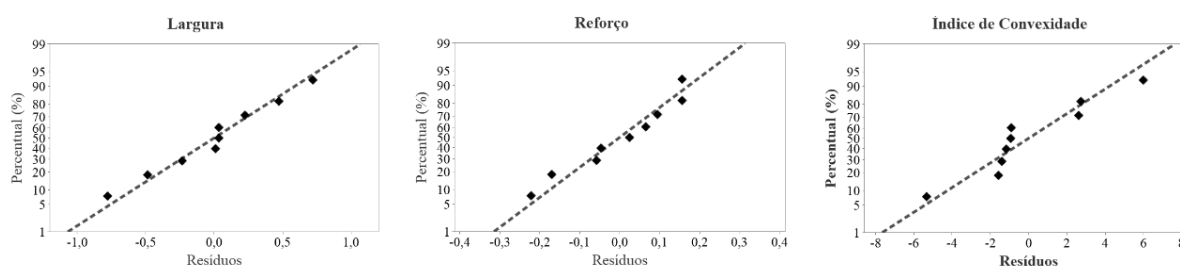
Tabela 22 – Sumário resumido dos modelos de regressão dos parâmetros de morfologia.

Modelo	S	R ²	R ² (aj)	PREQ	R ² (pred.)	AICc	BIC
Largura	0,6103	74,86%	67,12%	8,902	53,78%	47,08	44,79
Reforço	0,1878	86,27%	82,05%	0,952	71,49%	4,66	2,37
IC	4,2583	76,76%	69,61%	426,584	57,95%	117,02	114,73

Fonte: Adaptado de Guimarães (2020).

Largura, Reforço e IC. A distribuição dos resíduos próximos à reta normal indica o comportamento esperado dos resíduos, ou seja, sem valores com elevada dispersão e seguindo tendência normal, satisfazendo os pressupostos dos resíduos, validando o modelo teórico para futuras previsões.

Figura 30 – Probabilidade normal dos resíduos para as variáveis: largura, reforço, e índice de convexidade.



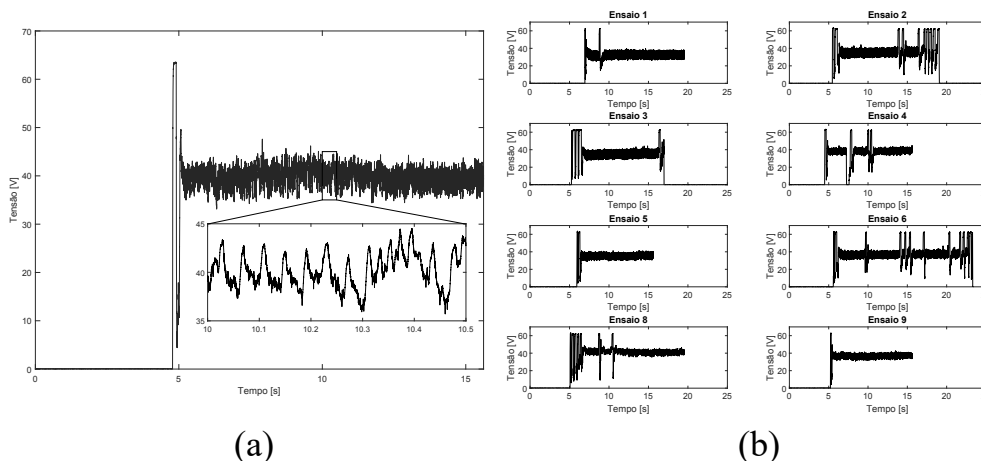
Fonte: Adaptado de Guimarães (2020).

4.2 Análise dos sinais elétricos

A partir da captura dos dados, o arquivo resultante é então processado para uma primeira compreensão do comportamento geral das soldagens. Para tornar claro a compreensão visual do comportamento observado nos oscilogramas, foi ampliada a exibição gráfica do ensaio nº 7, como é possível observar na Figura 31(a), enquanto os demais oscilogramas de tensão podem ser visualizados na Figura 31(b).

A demarcação do início do processo é o fenômeno de ignição do arco elétrico que, na Figura 31(a), corresponde às oscilações próximas aos 5 segundos. O fenômeno de abertura do arco pode dar-se de diferentes formas, influenciado pelo método de operação da fonte e pelo formato da ponta do arame. Em casos de imposição artificial de corrente, Santos e Dutra (2009) comentam que, tal qual fontes por comando de tensão, no momento em que ocorre o contato entre arame e metal de base, a fonte é comandada a impor níveis elevados de corrente, produzindo calor necessário para abertura do arco, o que ajuda a compreender as oscilações iniciais de todos os ensaios.

Figura 31 – Oscilograma de tensão e ampliação em trecho amostral de 0,5 segundo, a partir de ensaio com $I_m = 230 A$, $f_p = 23,26 Hz$, $\nu = 400 mm/min$ e $DBCP = 35 mm$ (a); Oscilogramas de tensão resultantes dos demais 8 ensaios (b).



Fonte: Autoria Própria.

Foram extraídas quatro amostras de cada ensaio, totalizando 36 amostras para avaliar o comportamento dos oscilogramas. Para manter paridade nas análises, todas foram tomadas a partir dos mesmos trechos temporais. Para isso, o domínio de todos os ensaios foram avaliados simultaneamente, evitando que fossem extraídos momentos com nenhuma relevância para o estudo, já que, como é possível notar, a duração dos ensaios é variável. O janelamento resultante está então resumido na Tabela 23. A ampliação apresentada entre os instantes 10,0 e 10,5 segundos na Figura 31 serve tanto para conferir maior clareza durante a avaliação, quanto para possibilitar a extração de resultados nas análises, já que a avaliação da pulsação considerando todo o processo é dificultada pela alta densidade de dados e da alta frequência de pulsação.

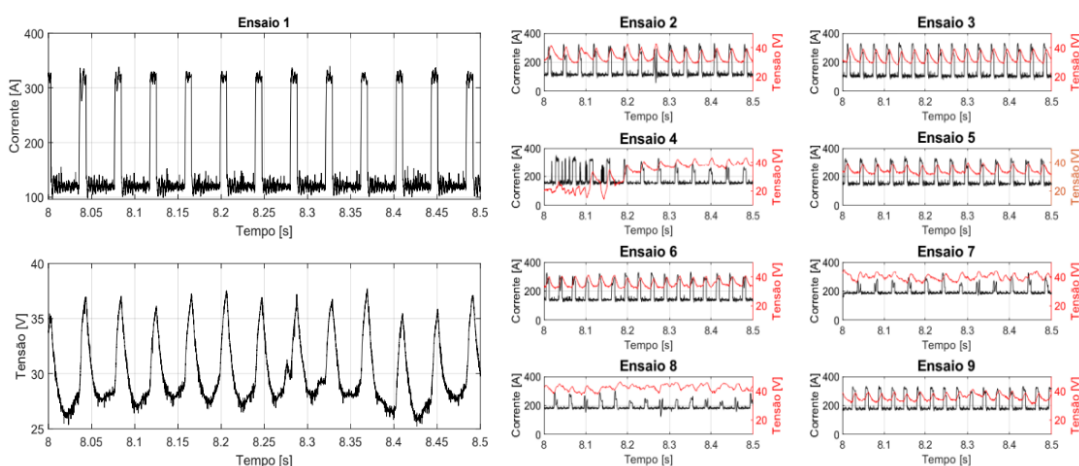
Tabela 23 – Intervalos de tempos analisados em cada ensaio.

Amostra	Tempo inicial [s]	Tempo final [s]
1	8,0	8,5
2	10,5	11,0
3	11,0	11,5
4	12,0	12,5

Fonte: Autoria Própria.

É possível observar visualmente por meio da Figura 32 a similaridade do comportamento do processo pulsado dentre todos os ensaios realizados considerando o mesmo trecho amostral, neste caso entre 8,0 e 8,5 segundos. Ao sobrepor os gráficos, nota-se a tendência da pulsação de tensão durante o momento de corrente de pico, com o crescimento do valor de tensão durante o início do tempo de pico e ápice ao final do mesmo.

Figura 32 – Sobreposições dos oscilogramas de corrente e tensão de amostras extraídas no período de 8,0 a 8,5 segundos de todos os ensaios.



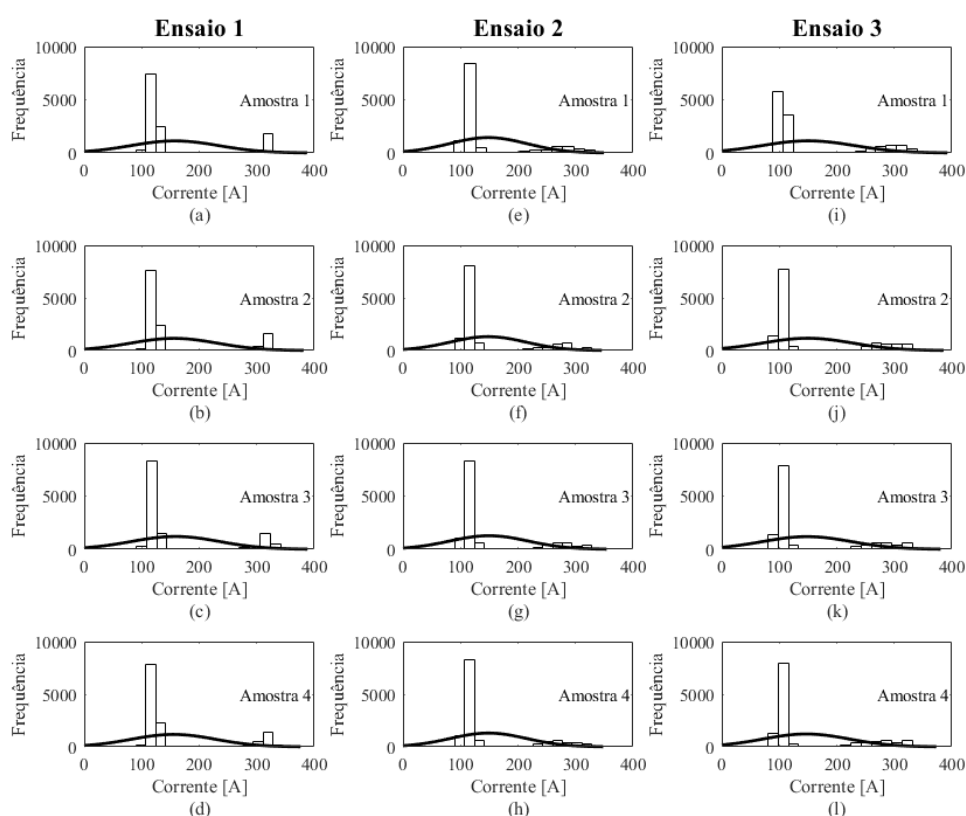
Fonte: Autoria Própria.

Ao analisar os oscilogramas de processos operando em diversas condições, Andrade (2012) identificou a repetibilidade do fenômeno de pulsação de tensão, mas também observou instabilidades no oscilograma correspondente. Essas instabilidades tornaram-se evidentes nos momentos em que a gota destacava-se, por vezes no tempo de base, por vezes no tempo de pico. O autor atribuiu esse fenômeno à prolongada duração do tempo de pulso, prejudicando a controlabilidade do processo. Importante ressaltar que essa instabilidade não teve reflexos no formato do cordão, que exibiu um acabamento satisfatório e ausência de respingos, resultado da baixa corrente de pulso aplicada. Em relação à transferência de múltiplas gotas por pulso, Posinasetti, Kang e Yarlaga (2006) experimentaram significativa instabilidade, incluindo curto-circuitos e a produção de MDPP em ensaios com arame de alumínio ER 4047. No caso específico dos ensaios 7 e 8 (conforme apresentado na Figura 32), nos quais a instabilidade é notavelmente maior em comparação com os demais ensaios, não é plausível assumir imediatamente a hipótese do fenômeno de MDPP, pois não há evidências suficientemente claras para comprovação, mesmo que casos relatados na teoria sejam comparativamente similares.

Na análise dos histogramas de corrente das amostras – Figuras 33, 34, e 35 para ensaios com I_m de 170, 200 e 230 A, respectivamente –, é possível observar comportamento similar à avaliação da totalidade dos dados dos ensaios, disponível no Apêndice B, onde a curva de distribuição normal apresenta perfil alongado devido à grande dispersão dos dados, com maior frequência de valores próximo aos valores de corrente de pico e de base. A distribuição não-normal é constatada a partir da aplicação de teste de Anderson-Darling, sendo obtido p-valores abaixo de 0,05 para todas as amostras. Yamada, Hosooka e Ogata (1994) citam anormalidades de soldagem, como queda de fusão ou descentralização e irregularidades dos cordões como causa da não-normalidade dos sinais. Dutra, Marques e Silva (2012) em estudos sobre corrente

pulsada em soldas com arame de alumínio 4043 apontam para o fato de o desprendimento de gotas não refletir-se de forma clara no oscilograma como o causador da dispersão na análise de normalidade. Kumar, Albert e Chandrasekhar (2019) também apontam a ocorrência de variações aleatórias no comprimento do arco como causador do fenômeno. Ao avaliar a qualidade do sinal fornecido pela fonte, Bellec et al. (2018) encontrou causas relacionadas à variações de carga e à necessidade de maior compromisso entre a correção do fator de potência e a qualidade do arco.

Figura 33 – Histograma com curva de distribuição normal das amostras de corrente dos ensaios com $I_m = 170 A$.

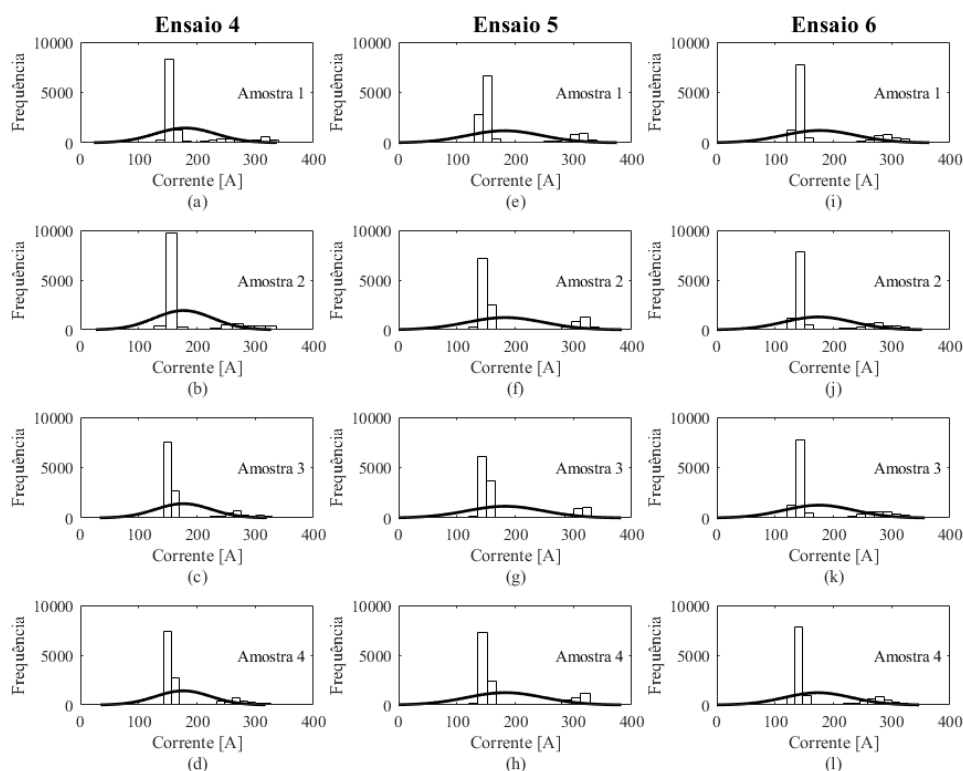


Fonte: Autoria Própria.

A avaliação por meio de histogramas apresenta maior efetividade nos sinais de tensão. Por se tratar de um processo realizado com fonte operando em corrente constante (regulável), a caracterização do arco é ditada pela tensão resultante da combinação da corrente com os demais parâmetros, característica essa denominada de Característica Estática do Arco (CEA) (SCOTTI; PONOMAREV, 2008). Em segunda instância, a faixa de variação de tensão encontra-se em uma amplitude menor de grandeza. Os sinais de corrente, por variarem em uma faixa de amplitude elevada, com destaque para a corrente de pico (comprovada pelo elevado valor de desvio padrão), apresentam a distribuição abrangente constatada nos histogramas.

Nos histogramas de tensão, destacam-se valores frequentes acima de 60 V, especialmente nos ensaios 2, 3, 4, 6 e 8. Conforme demonstrado por Neves et al. (2021b), esse fenômeno resulta do encerramento do arco elétrico, levando a uma operação da fonte em tensão em vazio.

Figura 34 – Histograma com curva de distribuição normal das amostras de corrente dos ensaios com $I_m = 200 A$.



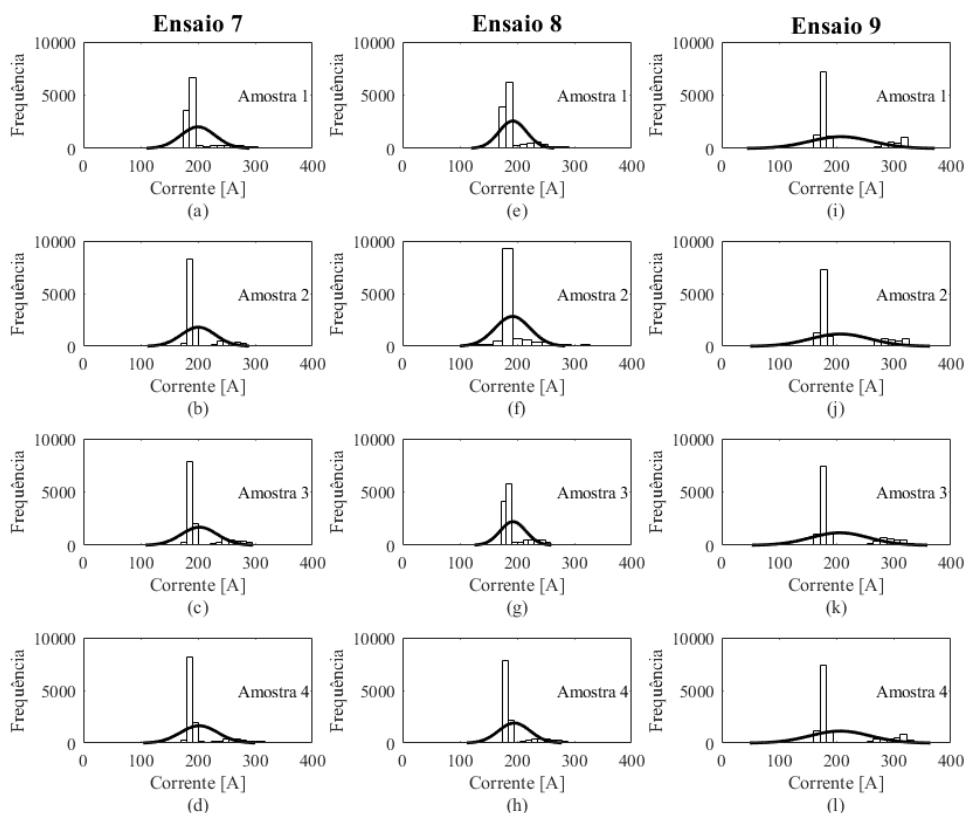
Fonte: Autoria Própria.

A manifestação temporal dessas ocorrências é visível nos oscilogramas correspondentes. A causa pode ser atribuída a instabilidades na fonte e na parametrização do processo, sendo confirmada como instabilidade pela análise conjunta de outros fatores, como o resultado final do cordão.

Nas Figuras 39, 40 e 41, é possível ver os ciclogramas para cada amostra dos ensaios operando com corrente média de 170 A, 200 A, e 230 A, respectivamente. Foi constatado maior irregularidade na formação dos ciclogramas nos ensaios com corrente média de 230 A, mas sem encerramento do arco, identificado por pontos com corrente e/ou tensão nula. Tais instabilidades na variação dos ciclogramas podem ser um dos indícios de instabilidade no processo e corrente média operando próximo à faixa de transição de transferência. Nos demais ensaios, os ciclogramas mantiveram-se dentro da faixa operacional do processo, o que indica que os mesmos comportaram-se de forma controlada.

Resultados similares também foram obtidos por Andrade (2012), mas com região do ciclograma mais ajustada e com menos dispersões, o que deve-se à menor faixa operacional dos parâmetros de pulso utilizados em seus experimentos, como também pela reduzida densidade de pontos coletados. Muñoz, Carvalho e Alfaro (2014) puderam observar, com uso de técnica de perfilografia, regiões de transferências metálicas no ciclograma, apontando a operação próxima aos 210 A como uma das fases de transição, o que entra em acordo com a tendência a irregularidade dos ensaios deste estudo operando acima dos 200 A de corrente média.

Figura 35 – Histograma com curva de distribuição normal das amostras de corrente dos ensaios com $I_m = 230 A$.

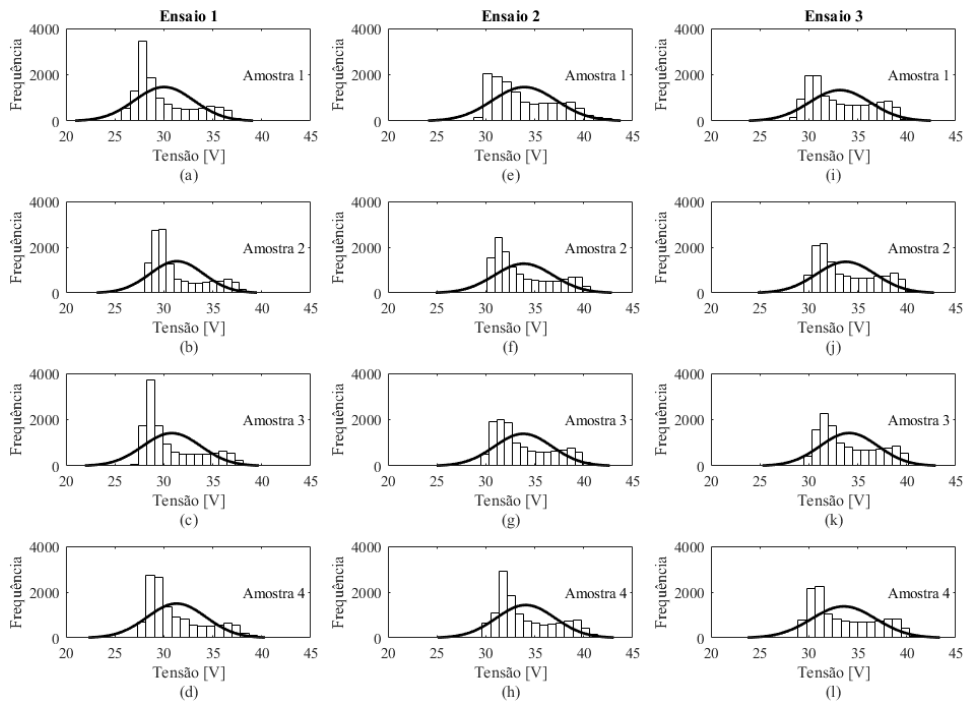


Fonte: Autoria Própria.

A partir de cada amostra, os valores de tensão, corrente e potência média e os desvios padrão foram obtidos e podem ser conferidos: na Tabela 24 para os ensaios com $I_m = 170 A$; na Tabela 25 para os ensaios com $I_m = 200 A$; e na Tabela 26 para os ensaios com $I_m = 230 A$. No Apêndice D, estão os resultados gerais de cada ensaio, constituídos da média das 4 amostras. Para compreender se a fonte forneceu os sinais de corrente tal como parametrizado, foi aplicado teste-t de uma amostra com $\alpha = 0,05$, com teste de hipótese para a proximidade do valor médio amostral com o valor médio hipotético, que neste caso, são os valores parametrizados. Caso o p-valor resultante for maior que α , temos a confirmação de que os valores encontram-se próximos ao parametrizados.

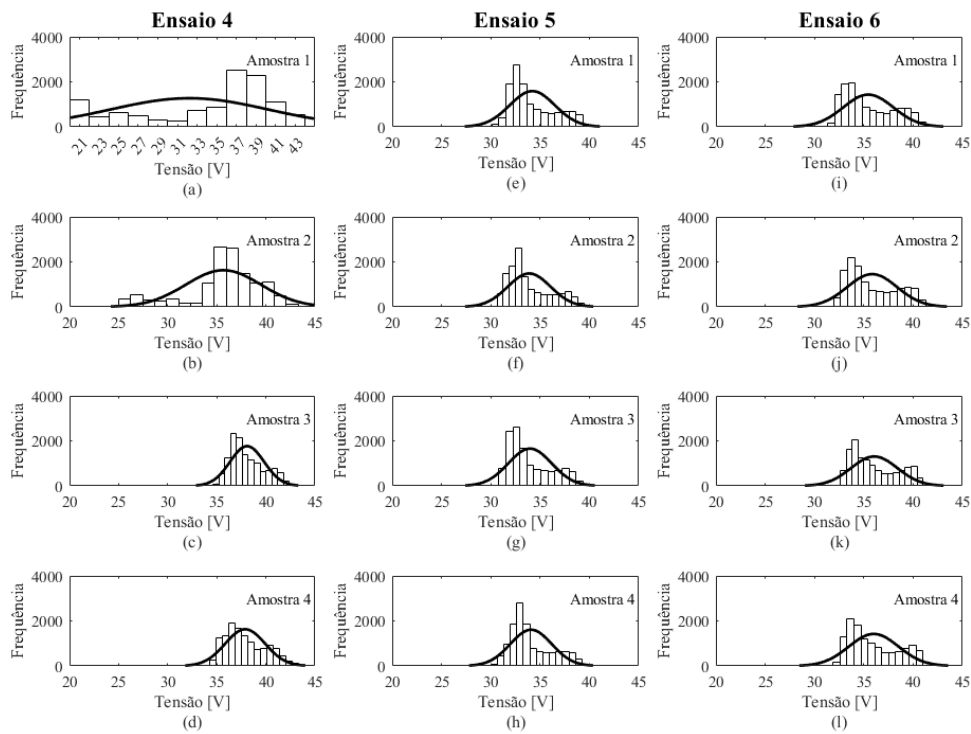
Os resultados (ver Tabela 27) indicam que os parâmetros responsáveis pelo desvio da corrente média do valor parametrizado foram a corrente de pico e de base. Os tempos de pico e de base, em sua maioria, mantiveram-se próximos ao ajustado. Situação semelhante foi observada por Ramos (2011) em processo P-GMAW, com desvio médio de $-30 A$ na corrente de pico e $+24 A$ na corrente de destacamento. Neves et al. (2021b) relatou desvios semelhantes em experimentos com FCAW pulsado: $+85 A$ na corrente de pico e $+15 A$ na corrente de base. No entanto, não foram associados problemas ou defeitos no cordão ao ajuste do sinal fornecido pela fonte.

Figura 36 – Histograma com curva de distribuição normal das amostras de tensão dos ensaios com $I_m = 170 A$.



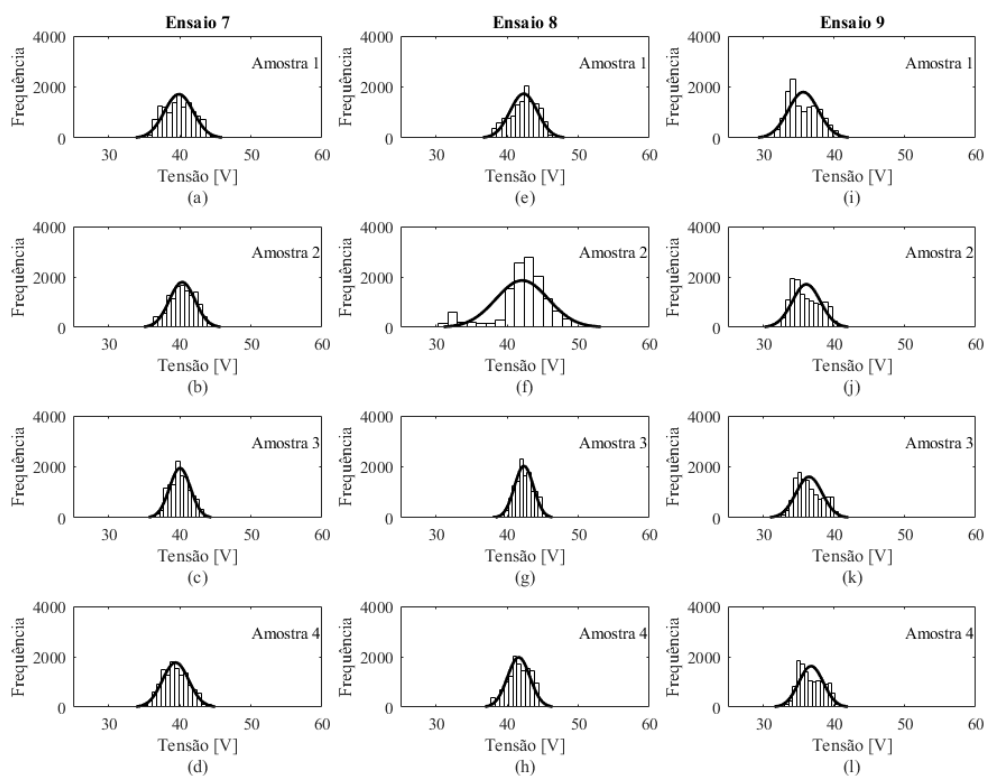
Fonte: Autoria Própria.

Figura 37 – Histograma com curva de distribuição normal das amostras de tensão dos ensaios com $I_m = 200 A$.



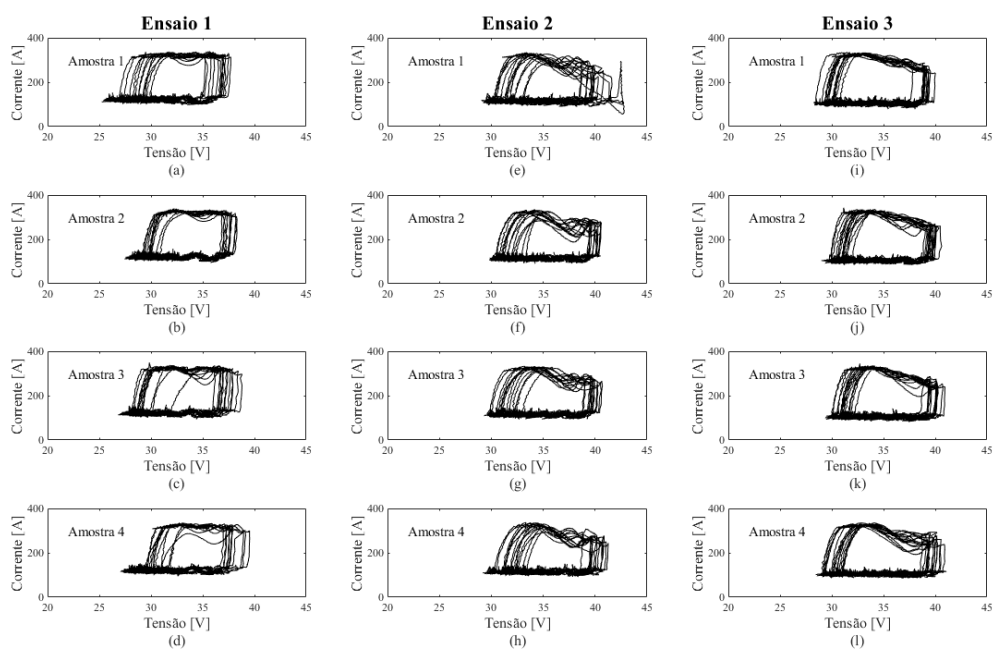
Fonte: Autoria Própria.

Figura 38 – Histograma com curva de distribuição normal das amostras de tensão dos ensaios com $I_m = 230 A$.

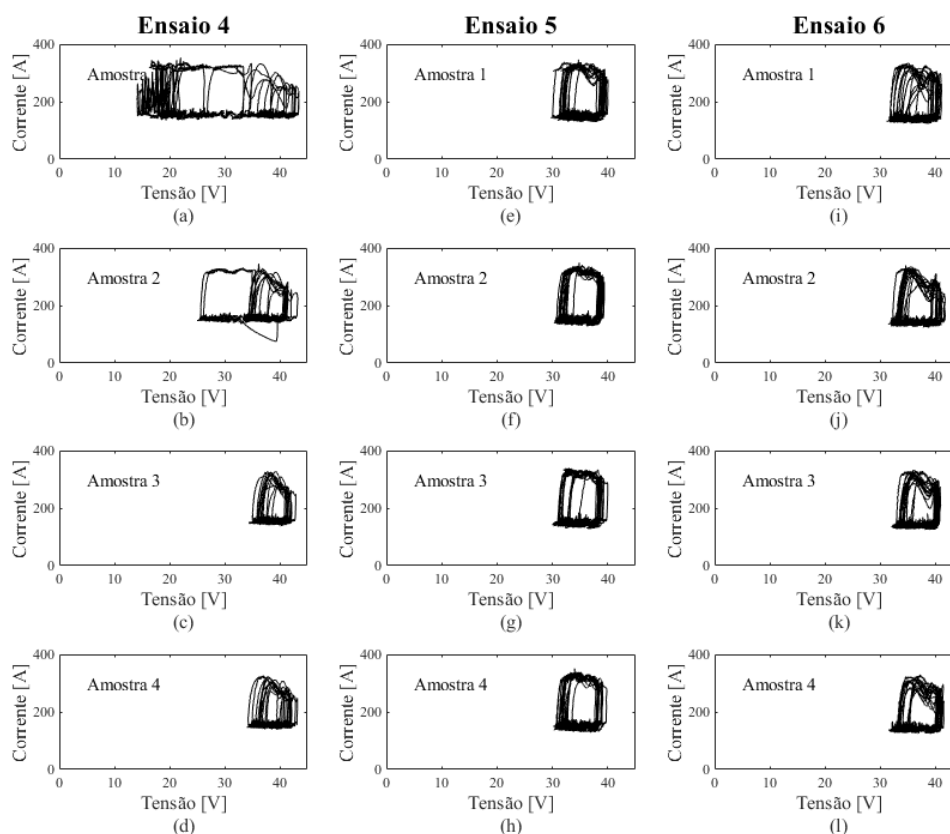


Fonte: Autoria Própria.

Figura 39 – Ciclograma das amostras dos ensaios com $I_m = 170 A$.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 40 – Ciclograma das amostras dos ensaios com $I_m = 200 A$.

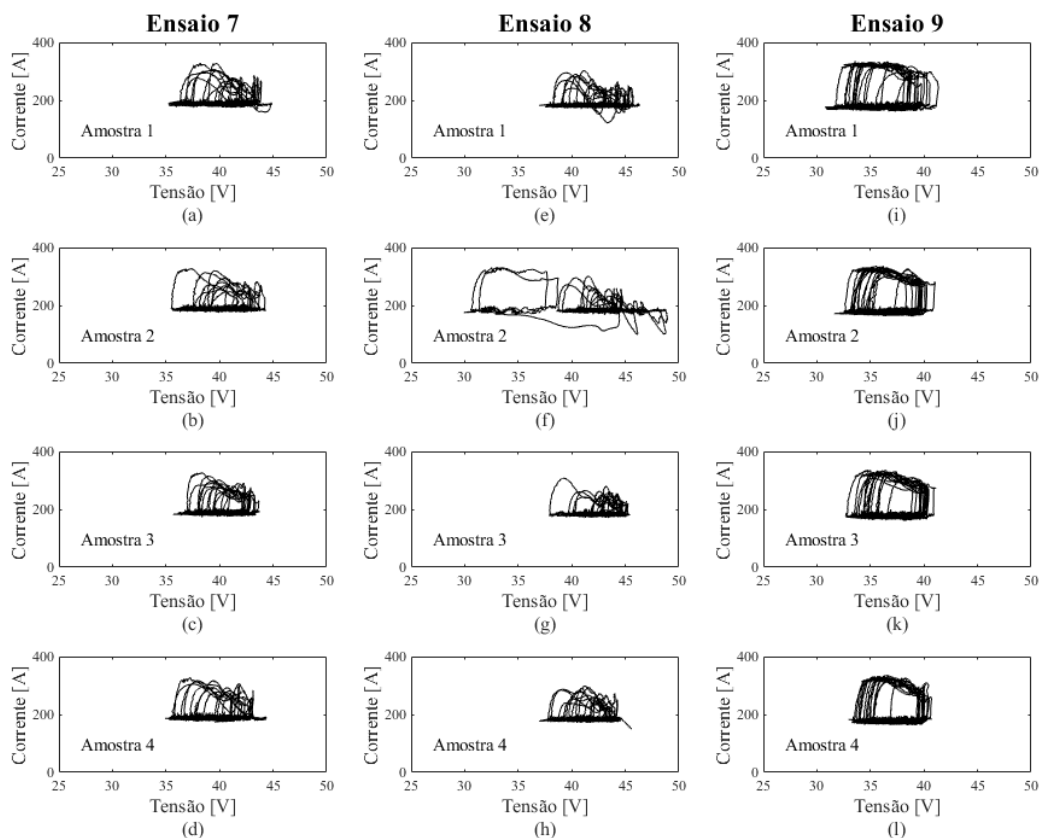
Fonte: Autoria Própria.

A análise das frequências que constituem os oscilogramas de tensão foi realizada utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT). Nesta análise, procedeu-se a verificar todo o conjunto de dados de tensão de todos os ensaios realizados. Em todos os ensaios, há a predominância da frequência principal, aproximadamente à regulada na fonte de soldagem, seguida de componentes múltiplas da frequência principal na ordem de 2 e 3 vezes, tal como destacado em cada gráfico da Figura 42. Este é um fenômeno já relatado em literatura por Silva et al. (2011) e Ramos (2011) e é definido por Hanzelka e Bien (2004) como componentes inter-harmônicos gerados pela flutuação no valor de tensão, causado por instabilidade no fornecimento do sinal por parte da fonte de soldagem ou pelo sinal da rede elétrica e que, na maioria das situações, não reflete-se no resultado final da soldagem.

Para a modelagem das regressões, são apresentadas as ANOVAs das variáveis de interesse sobre as de resposta: os dados de tensão, corrente e potência média, respectivamente as Tabelas 28, 29, e 30. Em negrito, estão os p-valores menores que α , de forma a destacar àquelas em que a hipótese nula fora aceita. Na Tabela 31, os p-valores das ANOVAs das regressões dos sinais elétricos propõem uma análise resumida das relações entre as variáveis independentes e a variável de resposta.

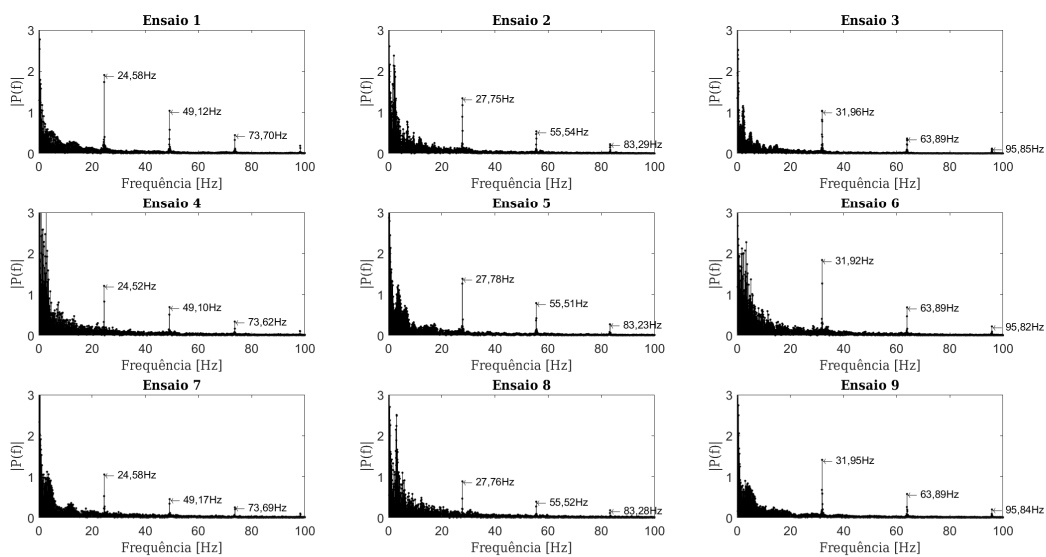
A corrente média apresenta a maior influência significativa para todas as regressões construídas, demonstrando este ser o parâmetro mais crítico para a regulagem do processo.

Figura 41 – Ciclograma das amostras dos ensaios com $I_m = 230 A$.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 42 – Espectros de frequência dos oscilogramas de tensão dos ensaios.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 24 – Resultados de corrente, tensão e potência média registrados nas amostras dos ensaios com $I_m = 170A$.

Parâmetros de ensaio	Resultados Obtidos						
	Amostra	\bar{V} [V]	σ_V [V]	I_m [A]	σ_I [A]	\bar{P} [kW]	σ_P [kW]
$I_m = 170 A$	1.1	30,024	3,026	159,620	76,683	4,878	2,860
$f_p = 23,26 Hz$	1.2	31,321	2,727	158,897	75,146	5,010	2,834
$\nu = 300 mm/min$	1.3	30,810	2,959	159,401	76,588	5,022	2,878
DBCP = 30 mm	1.4	31,305	3,001	160,045	73,663	4,995	2,844
$I_m = 170 A$	2.1	33,937	3,277	152,425	67,146	5,117	2,632
$f_p = 26,32 Hz$	2.2	33,872	2,998	150,051	65,904	5,108	2,615
$\nu = 350 mm/min$	2.3	33,819	2,946	149,472	68,214	5,147	2,660
DBCP = 35 mm	2.4	34,073	2,994	149,602	66,481	5,156	2,635
$I_m = 170 A$	3.1	33,168	3,099	151,081	80,708	5,075	2,965
$f_p = 30,30 Hz$	3.2	33,784	3,001	144,743	78,852	5,139	2,989
$\nu = 400 mm/min$	3.3	34,108	2,950	159,746	77,434	5,141	2,929
DBCP = 40 mm	3.4	33,562	3,272	159,802	75,399	5,023	2,847

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 25 – Resultados de corrente, tensão e potência média registrados nas amostras dos ensaios com $I_m = 200A$.

Parâmetros de ensaio	Resultados Obtidos						
	Amostra	\bar{V} [V]	σ_V [V]	I_m [A]	σ_I [A]	\bar{P} [kW]	σ_P [kW]
$I_m = 200 A$	4.1	32,201	2,533	184,877	62,744	5,766	2,580
$f_p = 23,26 Hz$	4.2	35,675	2,525	172,893	59,384	6,350	2,412
$\nu = 350 mm/min$	4.3	38,082	2,346	176,768	60,585	6,770	2,494
DBCP = 40 mm	4.4	37,889	2,516	177,802	57,879	6,722	2,435
$I_m = 200 A$	5.1	34,209	8,036	184,287	52,322	6,291	2,112
$f_p = 26,32 Hz$	5.2	33,891	3,825	186,363	50,165	6,282	2,076
$\nu = 400 mm/min$	5.3	33,976	1,737	187,093	47,794	6,279	2,031
DBCP = 30 mm	5.4	34,078	2,038	187,094	47,156	6,300	2,019
$I_m = 200 A$	6.1	35,456	2,285	177,464	64,164	6,335	2,516
$f_p = 30,30 Hz$	6.2	35,843	2,168	176,022	66,552	6,301	2,579
$\nu = 300 mm/min$	6.3	36,055	2,190	176,395	66,319	6,379	2,570
DBCP = 35 mm	6.4	36,003	2,096	175,485	66,223	6,324	2,540

Fonte: Autoria Própria.

Isso entra em acordo com a teoria exposta até então, haja visto que o patamar de corrente média, além de ser um dos principais indutores da oscilação de tensão, também define o tipo de transferência metálica que irá ocorrer no processo. Na análise da tensão média, nota-se a contribuição significativa apenas dos parâmetros de corrente média e DBCP, o que está em acordo com a literatura, que afirma sobre a dependência da intensidade da corrente para o comportamento do sinal de tensão. Por sua vez, como a tensão é indutora do arco, alterações em

Tabela 26 – Resultados de corrente, tensão e potência média registrados nas amostras dos ensaios com $I_m = 230A$.

Parâmetros de ensaio	Resultados Obtidos						
	Amostra	\bar{V} [V]	σ_V [V]	I_m [A]	σ_I [A]	\bar{P} [kW]	σ_P [kW]
$I_m = 230 A$	7.1	39,871	1,915	198,465	24,155	7,985	1,090
$f_p = 23,26 Hz$	7.2	40,337	3,683	201,929	30,667	8,107	1,246
$\nu = 400 mm/min$	7.3	40,024	1,334	199,840	22,377	8,118	1,038
DBCP = 35 mm	7.4	39,410	1,577	201,102	27,627	7,982	1,212
$I_m = 230 A$	8.1	42,318	2,133	191,705	54,633	8,148	2,183
$f_p = 26,32 Hz$	8.2	42,107	1,975	187,987	52,318	8,057	2,112
$\nu = 300 mm/min$	8.3	42,355	1,845	193,687	51,066	8,175	2,081
DBCP = 40 mm	8.4	41,623	1,728	194,147	52,518	8,128	2,081
$I_m = 230 A$	9.1	35,652	2,028	209,817	29,989	7,462	1,332
$f_p = 30,30 Hz$	9.2	36,085	1,796	203,387	29,631	7,503	1,321
$\nu = 350 mm/min$	9.3	36,473	1,470	203,267	31,331	7,554	1,387
DBCP = 30 mm	9.4	36,754	1,850	212,616	32,599	7,622	1,427

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 27 – Teste-T para 1 amostra com os resultados de corrente média.

Ensaio	I_p	I_b	t_p	t_b	I_m
1	0,000	0,000	0,011	0,000	0,000
2	0,001	0,000	0,453	0,013	0,000
3	0,040	0,000	0,130	0,000	0,022
4	0,014	0,000	0,069	0,254	0,003
5	0,003	0,000	0,454	0,000	0,000
6	0,000	0,000	0,056	0,000	0,000
7	0,000	0,000	0,222	0,262	0,000
8	0,000	0,000	0,790	0,754	0,000
9	0,019	0,000	0,458	0,140	0,002

Fonte: Autoria Própria.

seu comprimento surtirá efeitos diretamente no comportamento desta (DURAND, 2007).

A velocidade de soldagem, por sua vez, foi a variável que influenciou a menor quantidade de respostas, dentre elas a corrente média, com o menor percentual de contribuição, entretanto. Isso pode ser explicado pela manutenção da razão entre velocidade de alimentação e taxa de fusão de arame, o que pode ter contribuído para manter o comprimento do arco constante (MODENESI, 2007). Tais resultados possuem concordância com estudos similares realizados por Ferreira (2022): ao avaliar a parametrização de corrente pulsada com frequência de pulsação entre 18,18 Hz à 22,22 Hz, também foram constatadas influência da corrente sobre a potência eficaz da mesma.

Tabela 28 – Resultados da ANOVA para a equação de regressão da variável Tensão Média.

Fonte	GL	SQ Seq.	Contr.	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Fator F	P-valor
Regressão	4	338,472	85,54%	338,472	84,618	45,86	0,000
I_m	1	261,796	66,17%	261,796	261,796	141,89	0,000
f_p	1	1,198	0,30%	1,198	1,198	0,65	0,426
ν	1	0,945	0,24%	0,945	0,945	0,51	0,480
DBCP	1	74,533	18,84%	74,533	74,533	40,40	0,000
Erro	31	57,196	14,46%	57,196	1,845		
Falta de ajuste	4	31,358	7,93%	31,358	7,839	8,19	0,000
Erro puro	27	25,838	6,53%	25,838	0,957	—	—
Total	35	395,668	100,00%				

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 29 – Resultados da ANOVA para a equação de regressão da variável Corrente Média.

Fonte	GL	SQ Seq. ($\times 10^3$)	Contr.	SQ (Aj.) ($\times 10^3$)	QM (Aj.)	Fator F	P-valor
Regressão	4	12,963	95,51%	12,963	3240,8	164,70	0,000
I_m	1	12,288	90,53%	12,288	12288,3	624,51	0,000
f_p	1	0,000	0,00%	0,000	0,1	0,00	0,946
ν	1	0,107	0,79%	0,107	107,1	5,44	0,026
DBCP	1	0,568	4,18%	0,568	567,8	28,86	0,000
Erro	31	0,610	4,49%	0,610	19,7		
Falta de ajuste	4	0,264	1,94%	0,264	65,9	5,14	0,003
Erro puro	27	0,346	2,55%	0,346	12,8	—	—
Total	35	13,573	100,00%				

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 30 – Resultados da ANOVA para a equação de regressão da variável Potência Média.

Fonte	GL	SQ Seq.	Contr.	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Fator F	P-valor
Regressão	4	48,865	97,66%	48,865	12,216	324,01	0,000
I_m	1	48,252	96,44%	48,252	48,252	1279,77	0,000
f_p	1	0,161	0,32%	0,161	0,161	4,26	0,047
ν	1	0,000	0,00%	0,000	0,000	0,00	0,975
DBCP	1	0,453	0,90%	0,453	0,453	12,01	0,002
Erro	31	1,169	2,34%	1,169	0,038		
Falta de ajuste	4	0,457	0,91%	0,457	0,114	4,34	0,008
Erro puro	27	0,712	1,42%	0,712	0,026	—	—
Total	35	50,034	100,00%				

Fonte: Autoria Própria.

$$\bar{V} = 4,56 + 0,1109I_m - 0,0633f_p - 0,00397\nu + 0,3524DBCP \quad (4.4)$$

$$I = 46,2 + 0,7543I_m + 0,017f_p + 0,0422\nu - 0,973DBCP \quad (4.5)$$

$$\bar{P} = -3,351 + 0,04726I_m - 0,0232f_p - 2,5 \times 10^{-5}\nu + 0,0274DBCP \quad (4.6)$$

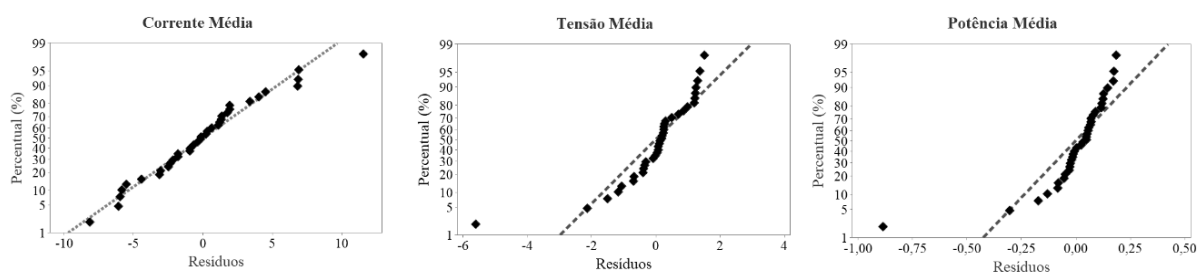
Tabela 31 – Resumo das ANOVAs, com os p-valores resultantes para tensão, corrente e potência média.

	\bar{V}	I_m	\bar{P}
I_p	0,000	0,000	0,000
f_p	0,426	0,946	0,047
ν	0,480	0,026	0,975
DBCP	0,000	0,000	0,002

Fonte: Autoria Própria.

Finalizando a análise das regressões, é necessário observar o comportamento dos resíduos. Como exposto na Equação 2.40, o resíduo é a diferença entre o valor real para o valor ajustado correspondente. De acordo com o pressuposto dos resíduos, estes devem estar distribuídos de forma normal e com variância constante. Tais pressupostos são analisados com ajuda do gráfico de probabilidade normal da Figura 43, o qual os resíduos são organizados em função de quartis teóricos de distribuição normal, fazendo com que a normalidade aproxime-se de uma reta à 45° em relação ao eixo "x". Como é perceptível, os resíduos apresentam comportamento com tendência à normalidade, servindo como validação aos modelos regressivos apresentados.

Figura 43 – Probabilidade normal dos resíduos para as variáveis: tensão média, corrente média e potência média.



Fonte: Autoria Própria.

Na análise do desempenho dos modelos construídos, é possível concluir, a partir dos resultados da Tabela 32, que os resultados estatísticos são positivos para os modelos construídos. A capacidade dos modelos em descrever as respostas é comprovada pelo reduzido valor de desvio padrão (S), bem como a qualidade dos modelos em ajustarem-se aos dados amostrais, comprovados pelos valores de R^2 , todos acima de 85%. O elevado percentual de R^2 predito das equações também é um indicador positivo para o uso destas como modelos para dimensionamento e parametrização de ensaios fora dos limites numéricos dos dados usados para construção dos modelos. Por fim, os dados de AICc e BIC indicam que há a possibilidade de simplificação dos modelos de corrente e tensão média, já que os valores elevados em comparação aos resultados da regressão de \bar{P} indicam que existem preditores que não contribuem com o ajuste dos mesmos.

Tabela 32 – Sumário resumido dos modelos de regressão dos sinais elétricos.

Modelo	S	R ²	R ² (aj.)	PREQ	R ² (pred.)	AICc	BIC
I_m	4,4358	95,91%	94,93%	826,307	93,91%	218,94	225,54
\bar{V}	1,3583	85,54%	83,68%	73,173	81,51%	133,73	140,33
\bar{P}	0,1942	97,66%	97,36%	1,496	97,01%	-6,33	0,27

Fonte: Autoria Própria.

A análise dos efeitos médios principais é uma metodologia para exemplificar de forma gráfica os índices das equações de regressão, onde a grandeza do índice define o grau de relação, assim como o sinal: índices positivos indicam que a relação é diretamente proporcional, enquanto índices negativos indicam uma relação inversamente proporcional. Avaliando os efeitos na tensão média, apresentados na Figura 44(a), nota-se o controle desta por parte da corrente média de maneira direta, efeito natural do tipo de controle, como também explicado por Lei de Ohm, onde a tensão aumenta proporcionalmente com o aumento da corrente média. A relação entre tensão e DBCP também é perceptível e compatível com a relação existente entre a variação da tensão e o comprimento do arco (ou comprimento de *stick-out*). A frequência de pulsação, ainda que aponte para relação inversamente proporcional, não leva a conclusão efetiva de relação, enquanto a velocidade de soldagem não afetou de forma significativa a tensão.

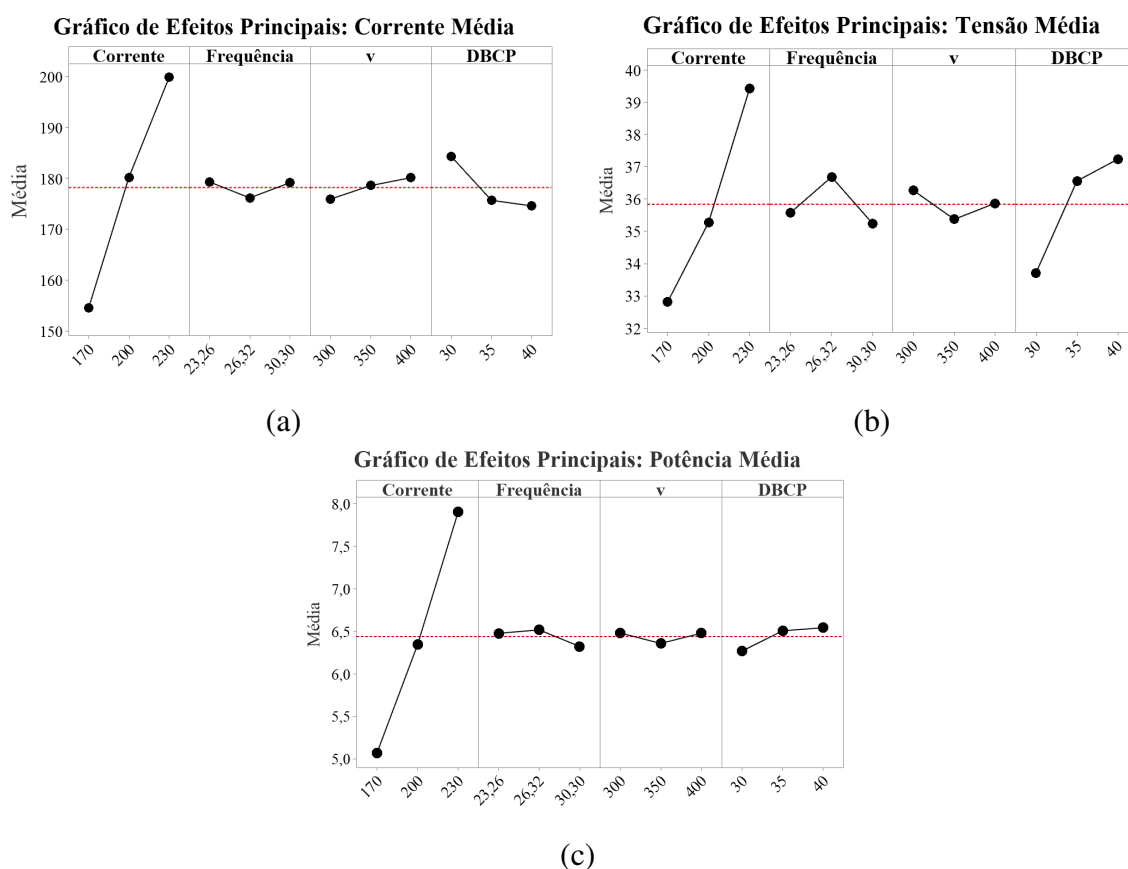
A análise da corrente média apresentou resultados dentro do esperado, como é observado na Figura 44(b). A relação direta entre a corrente mensurada nos ensaios e a regulagem na fonte de soldagem é constatada, ainda que os valores médios para cada patamar de I_m estejam abaixo da regulagem, como exposto anteriormente. O fato de a corrente ser artificialmente imposta pela fonte é também comprovada, haja vista que nenhum outro fator categórico afetou a alteração no valor médio da corrente de forma significativa.

Na análise do comportamento da potência, que pode ser observado na Figura 44(c), observa-se que apenas a corrente média afetou de forma significativa a variação média da potência. Este é um comportamento que está em acordo com a teoria, já que a potência gerada pelo arco é ditada pela lei de Ohm, ou seja, quão maior for a intensidade da corrente, maior será a potência média resultante (MODENESI, 2007).

4.3 Índices de Verificação de Estabilidade

Nesta etapa das análises, foram considerados no estudo: a contagem de número de picos de tensão e o indicador de grau de instabilidade I_{DC} , já estabelecidos para estudo de processos com corrente pulsada; e indicadores de transferência por curto-circuito que possuam características de análise periódica adaptáveis ao contexto da transferência pulsada: índice Vilarinho (IV_{cc}), facilidade de transferência metálica (F_{cc} e F_{tm}) e regularidade de transferência metálica (R_{cc}), além da análise numérica dos ciclogramas. Os valores amostrais dos ensaios são base para compôr os resultados médios dos ensaios, que podem ser melhor avaliados no

Figura 44 – Gráfico de efeitos principais para os sinais elétricos do processo: tensão, corrente e potência média.



Fonte: Autoria Própria.

Apêndice E.

Nas Tabelas 33, 34, e 35 são apresentados os valores médios dos índices para os ensaios com corrente média de 170 A, 200 A, e 230 A, respectivamente. Na verificação do grau de instabilidade I_{DC} , não foram observados picos de corrente 30 A acima da corrente de pico para nenhum ensaio, o que configura um primeiro indicativo de estabilidade, neste caso para todos os ensaios.

É possível observar que a contagem de picos segue o comportamento da frequência de pulsação da corrente identificada na análise da FFT. Tal fato é comprovado por meio de teste-t para 1 amostra (Tabela 36), onde três desvios são observáveis. Nos casos dos ensaios 2 e 6, a mesma taxa de picos/s foram rigorosamente notadas nas 4 amostras, resultando no p-valor nulo por conta do desvio padrão nulo. Desta forma, é correto afirmar que para ambos, o valor é condizente.

No ensaio 8, onde uma média de aproximadamente 28 picos/s era esperada, a média resultante é inferior a 20, com desvio padrão de 1 pico/s. Devido ao comportamento instável do sinal, a detecção de picos pelo algoritmo torna-se incerta. Dentre as possíveis explicações, considera-se a faixa operacional da corrente no ensaio e a ocorrência de MDPP, conforme

Tabela 33 – Resultados dos índices de verificação de estabilidade extraídos a partir das amostras do ensaios com $I_m = 170A$.

Parâmetros de Ensaio	Resultados Obtidos						
	Amostra	$F_{cc} [s^{-1}]$	$F_{tm} [s^{-1}]$	R_{cc}	IV_{cc}	Picos/s	$A_{ciclo. [pixels]}$
$I_m = 170 A$	1.1	24,516	89,527	100,693	0,146	26	76842
$f_p = 23,26 Hz$	1.2	24,534	101,008	108,236	0,101	26	68470
$\nu = 300 mm/min$	1.3	24,535	100,579	540,708	0,145	26	75716
DBCP = 30 mm	1.4	24,553	85,058	3,175	0,368	24	79940
$I_m = 170 A$	2.1	27,806	61,332	3,442	0,529	28	74222
$f_p = 26,32 Hz$	2.2	27,803	89,623	40,209	0,113	28	71280
$\nu = 350 mm/min$	2.3	27,758	93,465	3,474	0,126	28	76515
DBCP = 35 mm	2.4	27,785	93,641	3,474	0,181	28	76590
$I_m = 170 A$	3.1	31,899	91,892	3,750	0,152	32	87044
$f_p = 30,30 Hz$	3.2	31,938	96,058	62,339	0,114	34	80242
$\nu = 400 mm/min$	3.3	31,944	98,231	3,750	0,147	32	79627
DBCP = 40 mm	3.4	31,872	89,449	3,749	0,202	32	86889

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 34 – Resultados dos índices de verificação de estabilidade extraídos a partir das amostras do ensaios com $I_m = 200A$.

Parâmetros de Ensaio	Resultados Obtidos						
	Amostra	$F_{cc} [s^{-1}]$	$F_{tm} [s^{-1}]$	R_{cc}	IV_{cc}	Picos/s	$A_{ciclo. [pixels]}$
$I_m = 200 A$	4.1	31,929	95,775	122,691	0,306	28	84083
$f_p = 23,26 Hz$	4.2	32,029	94,993	268,311	0,262	24	80017
$\nu = 350 mm/min$	4.3	31,936	91,813	216,017	0,137	26	95323
DBCP = 40 mm	4.4	31,907	94,203	80,946	0,158	26	71683
$I_m = 200 A$	5.1	32,148	60,554	3,152	1,976	28	67689
$f_p = 26,32 Hz$	5.2	24,661	92,166	3,272	0,523	30	77677
$\nu = 400 mm/min$	5.3	33,474	74,683	3,325	1,251	28	77182
DBCP = 30 mm	5.4	24,548	80,666	3,304	0,871	28	79761
$I_m = 200 A$	6.1	33,978	81,462	3,474	0,942	32	77361
$f_p = 30,30 Hz$	6.2	27,766	108,819	20,005	0,135	32	93110
$\nu = 300 mm/min$	6.3	27,766	98,356	3,474	0,213	32	81004
DBCP = 35 mm	6.4	27,673	111,668	3,477	0,193	32	81358

Fonte: Autoria Própria.

discutido por Subramaniam et al. (1998) e Shi et al. (2010), que demonstrou a relação da densidade de probabilidade do sinal de tensão com instabilidades na transferência de material. A confirmação dessas hipóteses requer a visualização do fenômeno em conjunto com a análise dos sinais.

Os resultados da ANOVA para modelagem da equação de regressão para picos/s, visto na Tabela 37 corroboram com o seu respectivo uso como forma de avaliar o comportamento

Tabela 35 – Resultados dos índices de verificação de estabilidade extraídos a partir das amostras do ensaios com $I_m = 230A$.

Parâmetros de Ensaio	Resultados Obtidos						
	Amostra	$F_{cc} [s^{-1}]$	$F_{tm} [s^{-1}]$	R_{cc}	IV_{cc}	Picos/s	$A_{ciclo. [pixels]}$
$I_m = 230 A$	7.1	25,593	44,880	1,536	1,612	28	47532
$f_p = 23,26 Hz$	7.2	24,445	63,613	1,258	2,447	22	46499
$\nu = 400 mm/min$	7.3	37,812	63,480	2,092	1,567	22	66912
DBCP = 35 mm	7.4	26,235	69,085	1,369	1,170	22	63089
$I_m = 230 A$	8.1	27,671	58,967	78,083	1,298	20	96684
$f_p = 26,32 Hz$	8.2	42,487	80,277	2,120	1,231	18	82799
$\nu = 3400 mm/min$	8.3	47,218	83,706	3,749	1,743	20	96247
DBCP = 40 mm	8.4	31,866	63,473	2,724	0,974	20	94013
$I_m = 230 A$	9.1	70,405	151,426	4,460	2,558	34	61837
$f_p = 30,30 Hz$	9.2	65,821	121,851	1,411	2,481	30	82257
$\nu = 350 mm/min$	9.3	196,897	328,361	1,718	4,687	32	69122
DBCP = 30 mm	9.4	33,615	85,894	1,572	1,462	32	62110

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 36 – Teste-T para 1 amostra para avaliação dos resultados de picos/s.

Ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p-valor	0,163	0,000	0,359	0,168	0,245	0,000	0,548	0,000	0,955

Fonte: Autoria Própria.

deste tipo de processo. O percentual de contribuição da regressão para traduzir os dados foi o mais elevado dentre os índices propostos, além de ter sido constatado influência de todos as variáveis categóricas, como é visto na Tabela 40. Os critérios de estudo de qualidade do ajuste mostram-se satisfatórios para a utilização do modelo para otimização paramétrica, com R^2 de 73,76%. O valor de 64,96% de R^2 predito indica nível de incerteza na tarefa de prever resultados fora dos limites dos dados utilizados para sua construção, resultado que pode dever-se aos desvios de medição destacados anteriormente. Na análise dos resíduos da Figura 45(a), obteve-se confirmação da qualidade do ajuste pela distribuição normal dos resíduos. Dentre as possibilidades para melhoria nos resultados, estão: ajuste dos dados usados para modelagem; aumento da ordem de interações entre termos; ou a inclusão de diferentes variáveis categóricas, como o proposto por Praveen, Kang e Yarlagadda (2008).

Dentre os índices de estabilidade para transferência por curto-circuito considerados para as análises, apenas o índice IV_{cc} apresentou capacidade de traduzir o comportamento do processo em algum nível quanto à manutenção dos fenômenos por meio da avaliação do oscilograma de tensão. Os resultados da ANOVA apresentados na Tabela 38 indicaram contribuição significativa da regressão em relação ao percentual de erros. Das variáveis consideradas, apenas corrente

média e DBCP apresentaram efeitos na variação dos resultados, indicando que melhora nos ajustes possam resultar em uma regressão mais confiável, como também indicam os valores de S elevados em comparação à média de resultados deste índice e o valor de R^2 predito, inferior às demais regressões. Avaliando os resíduos da Figura 45(b), é notável certo desvio de dados centrais da normalidade, indicando a necessidade de reavaliação do ajuste para melhor distribuição dos resíduos.

As regressões construídas com os valores dos índices F_{cc} , F_{tm} e R_{cc} apresentaram contribuição inferior à dos erros por falta de ajuste e erro puro. Isso significa que as variações nas respostas são mais afetadas pelos erros do que por influência dos fatores considerados. Os resultados das ANOVAs para estes índices podem ser observados no Apêndice F. Dentre os motivos para a invalidação do uso de tais índices, além de estes serem pensados para estudos de transferência por curto-circuito, estes são feitos para estudos de transferência metálica natural, sem imposição artificial do ciclo operacional. Como o ciclo de transferências é realizado de forma artificial, avaliar apenas a média do período de pulsação ou o tempo de pulso são de pouco auxílio.

Tabela 37 – Resultados da ANOVA para a equação de regressão da variável Picos/s.

Fonte	GL	SQ Seq.	Contr.	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Fator F	P-valor
Regressão	4	491,95	73,76%	491,95	122,987	21,78	0,000
I_m	1	80,67	12,09%	80,67	80,667	14,29	0,001
f_p	1	331,11	49,64%	331,11	331,113	58,64	0,000
ν	1	37,50	5,62%	37,50	37,500	6,64	0,015
DBCP	1	42,67	6,40%	42,67	42,667	7,56	0,010
Erro	31	175,05	26,24%	175,05	5,647		
Falta de ajuste	4	120,05	18,00%	120,05	30,013	14,73	0,000
Erro puro	27	55,00	8,25%	55,00	2,037	—	—
Total	35	667,00	100,00%				

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 38 – Resultados da ANOVA para a equação de regressão da variável IV_{cc} .

Fonte	GL	SQ Seq.	Contr.	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Fator F	P-valor
Regressão	4	24,0944	68,16%	24,0944	6,0236	16,59	0,000
I_m	1	18,2137	51,52%	18,2137	18,2137	50,16	0,000
f_p	1	0,9836	2,78%	0,9836	0,9836	2,71	0,110
ν	1	0,8590	2,43%	0,8590	0,8590	2,37	0,134
DBCP	1	4,0382	11,42%	4,0382	4,0382	11,12	0,002
Erro	31	11,2557	31,84%	11,2557	0,3631		
Falta de ajuste	4	2,7886	7,89%	2,7886	0,6972	2,22	0,093
Erro puro	27	8,4671	23,95%	8,4671	0,3136	—	—
Total	35	35,3501	100,00%				

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 39 – Resultados da ANOVA para a equação de regressão da variável Área do Ciclograma.

Fonte	GL	SQ Seq. ($\times 10^6$)	Contr.	SQ (Aj.) ($\times 10^6$)	QM (Aj.) ($\times 10^6$)	Fator F	P-valor
Regressão	4	1706,83	43,55%	1706,83	426,71	5,98	0,001
I_m	1	48,95	1,25%	48,95	48,95	0,69	0,414
f_p	1	107,43	2,74%	107,43	107,43	1,51	0,229
ν	1	535,82	13,67%	535,82	535,82	7,51	0,010
DBCP	1	1014,62	25,89%	1014,62	1014,62	14,22	0,001
Erro	31	2212,30	56,45%	2212,30	71,36		
Falta de ajuste	4	718,00	18,32%	718,00	179,50	3,243	0,027
Erro puro	27	1494,30	38,13%	1494,30	55,34	—	—
Total	35	3919,13	100,00%				

Fonte: Autoria Própria.

$$\text{Picos}/s = 12,29 - 0,0611I_m + 1,052f_p + 0,0250\nu - 0,2667DBCP \quad (4.7)$$

$$IV_{cc} = -4,88 + 0,0290I_m + 0,0573f_p + 0,0038\nu - 0,0820DBCP \quad (4.8)$$

$$A_{\text{ciclo.}} = 58866 - 47,6I_m + 599f_p - 94,5\nu + 1300DBCP \quad (4.9)$$

Tabela 40 – Sumário resumido dos modelos de regressão dos índices numéricos de estabilidade.

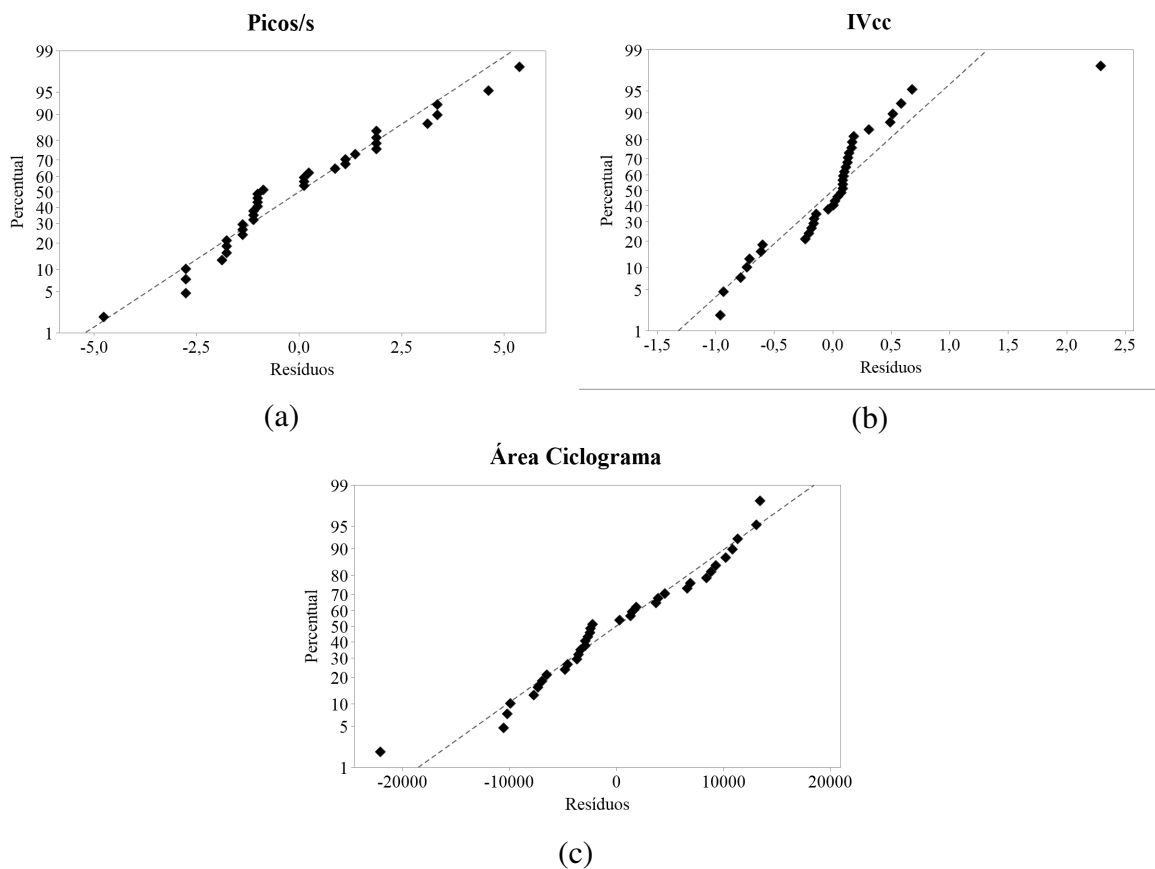
Modelo	S	R ²	R ² (aj.)	PREQ ($\times 10^3$)	R ² (pred.)	AICc	BIC
F_{cc}	26,5414	27,09%	17,68%	30,2139	0,00%	347,74	354,35
F_{tm}	41,6951	23,14%	13,23%	741,4595	0,00%	380,26	386,87
R_{cc}	92,8509	30,66%	21,71%	385,4420	0,00%	437,91	444,51
IV_{cc}	0,602568	68,16%	64,05%	0,01529	56,75%	75,20	81,81
Picos/s	2,37632	73,76%	70,37%	0,2337	64,96%	174,00	180,60
Área Ciclograma	14534,7	68,39%	36,78%	$3,7611 \times 10^6$	0,00%	244,76	203,94

Fonte: Autoria Própria.

De modo a tornar resumidos os resultados de interações do trabalho, foi construída a matriz de correlações da Tabela 41, e o comparativo entre resultados quantitativos e o visual dos cordões de solda, apresentados na Figura 46.

Dentre todas os índices quantitativos propostos, \bar{V} , \bar{P} e I_m são os que apresentaram resultados confiáveis para construção de modelos de regressão para futura parametrização de processos dentro de limites pré-estabelecidos. As correlações entre tensão, corrente, e potência com largura, reforço e IC encontram respaldo numérico nos estudos das ANOVAs, mas também teórico, pois é sabido que tais mudanças nestes parâmetros provocam alterações dimensionais em cordões de diferentes processos e em diferentes condições de transferência metálica. Os resultados mais satisfatórios de reforço, largura e IC corresponderam aos seguintes valores de tensão, potência e corrente média:

Figura 45 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos para Picos/s, IV_{cc} , e Área do Ciclograma.



Fonte: Autoria Própria.

- Largura: $\bar{V} > 34,039 V$; $I_m > 176,341 A$; $\bar{P} > 6,335 kW$
- Reforço: $\bar{V} > 35,948 V$; $I_m > 178,085 A$; $\bar{P} > 6,402 kW$
- IC: $\bar{V} \approx 42,101 V$; $186,209 A > I_m > 200,334 A$; $\bar{P} \approx 8,127 kW$

A contagem de picos/s auxiliou a compreender o comportamento dos ensaios, como era previsto. No entanto, nenhuma relação pôde ser confirmada entre a variação da periodicidade de transferências e a mudança na geometria dos cordões. Efeitos são mais perceptíveis quanto esta variação está em conjunto com a variação da corrente. Yao et al. (2019) ainda pôde observar influência da f_p na largura dos cordões de processos GMAW dupla pulsação, mas de forma sutil. O estudo de uma faixa maior de pulsação é uma alternativa para confirmação desta dependência.

A respeito do índice IC_{cc} , os resultados apresentados são positivos quanto ao seu relacionamento com os resultados de morfologia. Como é possível observar, as relações existentes entre este e a largura, reforço e IC são da mesma natureza que tensão, corrente e potência: diretamente proporcional à largura, e inversamente proporcional ao reforço e IC. As correlações moderadas podem ainda serem reforçadas com a realização de novos ensaios com novos conjuntos de parâmetros para a confirmação de sua eficácia. Sua utilização como ferramenta

para análise de estabilidade de processos pulsados já havia sido feito de forma bem sucedida por Neves et al. (2021b) e Neves et al. (2021a), sendo esta mais uma implementação de sucesso. Os resultados do índice IV_{cc} que relacionaram-se com os melhores valores de geometria de cordão foram:

- Largura: $IV_{cc} > 0,371$
- Reforço: $IV_{cc} > 0,763$
- IC: $1,155 > I_m > 1,699$

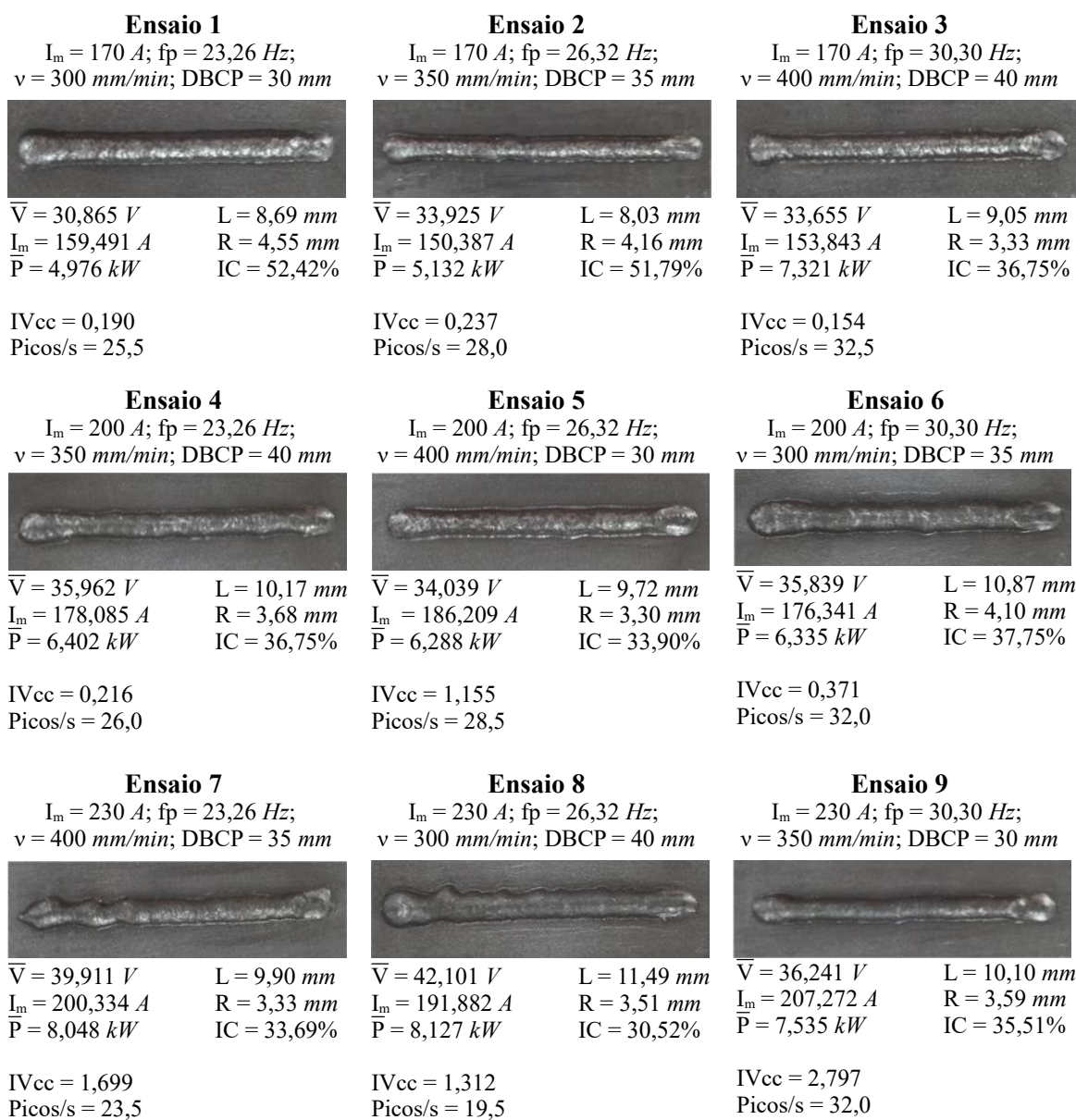
Por sua vez, a área do ciclograma, mesmo tendo gerado um modelo de regressão com ajuste satisfatório aos dados, como observa-se na Tabela 39 e pelos resultados da distribuição dos resíduos da Figura 45, não apresentou correlação significativa com nenhum dado de geometria de cordão de solda, indo na contramão aos resultados apresentados por Kuoch, Warinsiriruk e Joy-A-Ka (2019). Dentre as hipóteses para este resultado, a metodologia de cálculo da área do ciclograma está entre as principais, já que a ferramenta de processamento de imagens pode gerar imprecisões de medição. Não está descartada a aplicação do conceito inicial, porém, haja vista que uma relação diretamente proporcional fraca ainda é observada entre esta e a largura do cordão, mas que carece de maior aprofundamento de estudos.

Tabela 41 – Matriz de Correlação.

	\bar{V}	I_m	\bar{P}	Picos/s	IV_{cc}	$A_{ciclo.}$	L	R
I_m	0,674							
\bar{P}	0,815	0,699						
Picos/s	-0,576	-0,233	-0,219					
IV_{cc}	0,501	0,882	0,628	-0,053				
$A_{ciclo.}$	0,036	-0,338	-0,060	-0,065	-0,465			
L	0,751	0,687	0,660	-0,288	0,386	0,355		
R	-0,525	-0,522	-0,791	0,040	-0,467	0,101	-0,373	
IC	-0,718	-0,723	-0,868	0,128	-0,510	-0,116	-0,798	0,851

Fonte: Autoria Própria.

Figura 46 – Comparativo entre resultados numéricos e morfologia de cordões resultantes.



Fonte: Autoria Própria.

5 CONCLUSÕES

Esta dissertação teve como proposta o estudo estatístico de dados de corrente e tensão de soldas de revestimento com arame do tipo tubular e configuração de corrente no modo pulsado, com o objetivo de obter o grau de estabilidade dos processos quantitativamente, onde a validação dos resultados foi feita por meio de correlação dos dados com geometria dos cordões e comparação com bibliografia similar. Dentre as principais conclusões obtidas a partir da pesquisa:

1. A metodologia estatística empregada destacou-se ao fornecer *insights* valiosos sobre a execução de soldagens com arame tubular e corrente pulsada. Essa abordagem representa uma contribuição substancial para as futuras parametrizações de processos, estabelecendo limites claros e evidenciando correlações comprovadas entre os parâmetros. Tais resultados têm o propósito de orientar ajustes mais precisos, visando alcançar resultados específicos em termos de eficiência econômica e qualidade final do cordão de revestimento;
2. A caracterização do processo com arame tubular e corrente pulsada por metodologia de amostragem temporal e valores médio e desvio padrão mostrou-se exitosa, com as relações entre grandezas claramente observáveis, sem a necessidade da análise de todos os dados do ensaio. Isso traz benefícios através da redução do tempo de processamento de dados;
3. A análise gráfica, seja por histogramas, ciclogramas, e sobreposição de gráficos de corrente e tensão, conferem apenas uma perspectiva limitada quanto a periodicidade do processo, seu desempenho e qualidade final. Portanto, seu uso de forma isolada é de pouco proveito. Tais ferramentas possuem grande utilidade, entretanto, quando utilizadas para dar sentido aos dados numéricos extraídos dos oscilogramas;
4. As ferramentas ANOVA e análise de regressão empregadas obtiveram grande êxito para extração de resultados, auxiliando a quantificar as inter-relações paramétricas existentes. As regressões modeladas podem futuramente servir de base para configuração de processos, aumentando a chance de sucesso na obtenção de características de geometria de cordão;
5. As metodologias quantitativas de análise de transferência por curto-circuito, ao contrário do que fora previsto na fase de estudos, teve pouca contribuição para a análise de transferência do tipo pulsada. Dada sua construção matemática voltada à análise de processos convencionais de transferência, os resultados por eles mostrados não obtiveram correlação com nenhum parâmetro estudado. A utilização dos coeficientes de avaliação das regressões também auxiliaram no julgamento dos resultados e tomada de decisões por meio de análises de diferentes perspectivas, como a qualidade do ajuste, qualidade relativa entre diferentes modelos, e probabilidade de qualidade de ajuste de resultados fora dos dados

utilizados. Tais informações são de grande importância para a validação das equações para uso prático e para direcionamento dos estudos para possibilidades que apresentem chances promissoras de êxito;

6. O índice Vilarinho de regularidade (IV_{cc}), adaptou-se com maior efetividade à tarefa de estudo de processo pulsado. Um dos motivos para tal é sua metodologia considerar ambos períodos de base e de pulso, além das variações por meio de desvio padrão amostral. A correlação desta com as geometrias de cordão estão em sintonia com as correlações de corrente, tensão, e potência, o que abre a possibilidade futura de sua utilização para auxílio na parametrização de ensaios. Entretanto, os resultados de R^2 e a intensidade destas correlações ainda apontam para a necessidade de reforço dos estudos desta relação, como a realização e amostragem de maior quantidade de processos e revalidação dos resultados;
7. A contagem de picos de tensão por segundo prossegue sendo a ferramenta mais efetiva para avaliação da regularidade de processos com corrente pulsada. O estudo de seus resultados ajudaram a compreender os fenômenos de instabilidades no processo. Entretanto, sua relação com a geometria final dos cordões não pôde ser comprovada, haja visto que nos ensaios onde foram notadas maiores discrepâncias entre a pulsação configurada e a observada, foram onde os resultados de morfologia foram mais satisfatórios. Dentre as hipóteses para explicar tal fenômeno, está a faixa operacional de 230 A de corrente média, próximo à faixa de transição de modo de transferência metálica, fator que leva à instabilidades na formação da gota e que explica o comportamento mais imprevisível do sinal de tensão em tais ensaios. Esta hipótese, mesmo com provas que corroborem com sua afirmação, só pode ser completamente testada mediante observação do fenômeno com ferramentas de captura e processamento de imagens.
8. A metodologia de análise da área gráfica dos ciclogramas de potência demonstrou pouca contribuição, embora sua regressão tenha apresentado um bom ajuste com os dados de sinais elétricos. Foram observadas correlações baixas entre essa metodologia e os resultados de geometria do cordão. O potencial para futuros estudos dessa abordagem é sustentado não apenas por trabalhos similares que obtiveram resultados positivos, mas também pela correlação de 0,335 com a largura.

5.1 Perspectivas para trabalhos futuros

A metodologia utilizada neste trabalho possui possibilidades de aprimoramento com o intuito de fortalecer a qualidade das regressões aqui desenvolvidos. Primeiramente, ressalta-se a necessidade de realização de novos ensaios de revestimento com novas combinações de parâmetros, com o intuito de aumentar a margem de aplicação, além de procurar melhorar o ajuste das equações aos dados já utilizados anteriormente na sua construção. Desta maneira, é possível que sejam propostos equações de regressão para a parametrização de ensaios que

cumpram, com percentual de erro reduzido, a tarefa de estimar valores de parâmetros visando resultados específicos, seja em termos de potência média de processo, largura de revestimento ou largura de reforço.

Ao considerar os resultados dos testes utilizando os índices IV_{cc} e cálculo da área do ciclograma, cita-se a possibilidade da mudança na metodologia do emprego de ambas as ferramentas, como a construção de regressão com diferentes quantidades e relações entre termos. Para a área do ciclograma, uma abordagem diferente no método de cálculo da área pode vir a apresentar resultados mais fidedignos com a proposta, como ajuste geométrico ou utilização de redes neurais e *machine learning*.

5.2 Trabalhos relacionados à pesquisa

Foram desenvolvidas pesquisas correlacionados ao projeto principal da dissertação, e que resultaram nos seguintes trabalhos:

NEVES, A. C. et al. Study of arc welding stability in flux cored arc welding process and pulsed continuous current. **Welding International**, Taylor & Francis, v. 35, n. 4-6, p. 158–169, 2021. DOI: 10.1080/09507116.2021.1971936.

NEVES, A. C. et al. Estudo da estabilidade de uma soldagem de revestimento utilizando processo FCAW pulsado através da avaliação de oscilogramas de corrente e tensão. In: **XXVI SEI-SICITE**. Guarapuava/PR: UTFPR, 2021. p. 1–6.

GUIMARÃES, J. B. **Estudo dos parâmetros de soldagem em um revestimento de aço martensítico 410 NiMo pelo processo FCAW pulsado utilizando modelos de regressão**. 99 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Cornélio Procópio/PR, 2020. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/5427>>.

REFERÊNCIAS

- ALFARO, S. C. A.; PUÑALES, E. M. M. Stability on the GMAW process. In: **Welding: Modern Topics**. London/UK: IntechOpen, 2021. p. 49. DOI: 10.5772/intechopen.90386. Citado 3 vezes, nas páginas 37, 47 e 48.
- ALLUM, C. J. Recent developments in pulsed gas metal arc welding. In: Welding Institute of Canada (Ed.). **Welding for Challenging Environments**. Toronto, Ontario/CA: Pergamon, 1986. p. 1–10. DOI: 10.1016/B978-0-08-031866-0.50005-6. Citado na página 41.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals Handbook: Weld Overlays**. 9. ed. Metal Park, Ohio/EUA, 1983. v. 6. 52-537 p. Citado 4 vezes, nas páginas 21, 22, 23 e 25.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook**. 8. ed. Miami, FL/EUA: American Welding Society, 1991. v. 2. 955 p. ISBN 978-0871713544. Citado 2 vezes, nas páginas 20 e 21.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS A5.22/A5.22M**: Specification for stainless steel flux cored and metal cored welding electrodes and rods. 5. ed. Danvers, MA/EUA, 2012. 68 p. Citado na página 22.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS B2.1/B2.1M-BMG:2014**: Base metal grouping for welding procedure and performance qualification. 3. ed. Danvers, MA/EUA, 2014. 216 p. Citado na página 17.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS A5.34/A5.34M**: Specification for nickel-alloy flux cored and metal cored welding electrodes. 4. ed. Danvers, MA/EUA, 2020. 8 p. Citado na página 22.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS A5.20/A5.20M**: Specification for carbon steel electrodes for flux cored arc welding. 6. ed. Danvers, MA/EUA, 2021. 12 p. Citado na página 22.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS A5.29/A5.29M**: Specification for low-alloy steel electrodes for flux cored arc welding. 6. ed. Danvers, MA/EUA, 2022. 62 p. Citado na página 22.
- AMIN, M. Pulse current parameters for arc stability and controlled metal transfer in arc welding. **Metal Construction**, v. 15, n. 5, p. 272–278, 1983. Citado na página 40.
- ANAND, A.; KHAJURIA, A. Welding processes in marine application: A review. **International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research**, v. 2, n. 1, p. 215–225, 2013. Citado na página 23.
- ANDRADE, A. F. C. **Influência da corrente de pulso, tempo de pulso e diâmetro de gota sobre a estabilidade da transferência metálica no processo MIG-P**. 107 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Mestrado em Tecnologia de Materiais, Projetos Mecânicos, Termociências, Natal/RN, 2012. Citado 3 vezes, nas páginas 32, 76 e 78.
- ANOOP, C. A.; KUMAR, P. Application of Taguchi methods and ANOVA in GTAW process parameters optimization for aluminium alloy 7039. **International Journal of Engineering and Innovative Technology**, v. 2, n. 11, p. 54–58, 2013. Citado na página 61.

ANTUNES, P. D. **Influência do metal de adição na susceptibilidade à corrosão sob tensão de juntas soldadas de aço inoxidável ferrítico AISI 444 em meios contendo cloreto de magnésio**. 104 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá/MG, 2010. Citado na página 24.

ASSUNÇÃO, P. D. A. C. et al. Feasibility of narrow gap welding using the cold-wire gas metal arc welding (CW-GMAW) process. **Weld. World**, v. 61, p. 659–666, 2017. DOI: 10.1007/s40194-017-0466-5. Citado na página 49.

BAE, K. Y.; LEE, T. H.; AHN, K. C. An optical sensing system for seam tracking and weld pool control in gas metal arc welding of steel pipe. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 120, n. 1-3, p. 458–465, 2002. DOI: 10.1016/s0924-0136(01)01216-x. Citado na página 49.

BÁLSAMO, P. S. S. et al. Development of an experimental technique for studying metal transfer in welding: synchronized shadowgraphy. **Int. J. for the Joining of Materials**, v. 12, n. 1, p. 1–12, 2000. Citado na página 49.

BELLEÇ, Q. et al. Power factor correction and DC voltage control limits for arc welding application using pulsed current. In: **IECON 2018: 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. Washington, DC/EUA: IEEE, 2018. p. 1406–1411. DOI: 10.1109/IECON.2018.8592678. Citado na página 77.

BIAO, C. et al. Approximate entropy—a new statistic to quantify arc and welding process stability in short-circuiting gas metal arc welding. **Chinese Physics B**, v. 17, n. 3, p. 865, 2008. Citado na página 17.

BONANNI, C. G. **Uso combinado das técnicas DOE e simulação de Monte Carlo em um processo de soldagem MIG/MAG pulsado**. 104 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Itajubá/MG, 2005. Citado na página 25.

BRACARENSE, A. Q. **Processo de soldagem TIG-GTAW**. Belo Horizonte/MG: Universidade Federal de Minas Gerais, 2000. 21 p. Citado 2 vezes, nas páginas 32 e 33.

BRAGA, E. d. M. **Soldagem a arame tubular autoprottegido em corrente pulsada**. 95 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Belém/PA, 1997. Citado na página 17.

BRAGA, E. d. M.; MOTA, C. A. M. d.; FARIAS, J. P. Um estudo comparativo da soldagem a arame tubular autoprottegido em corrente pulsada e em tensão constante. **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, p. 1–8, 2000. Citado na página 53.

CASTELLANOS, O. M. et al. Evaluación de la transferencia metálica y estabilidad del proceso GMAW. **Revista UIS Ingenierías**, v. 20, n. 3, p. 47–60, 2021. DOI: 10.18273/revuin.v20n3-2021003. Citado na página 52.

CAVALCANTE, H. S. et al. Otimização de parâmetros operacionais do processo de soldagem FCAW para aplicação em revestimento duro. **Soldagem & Inspeção**, v. 25, n. e2522, p. 2020, 2020. DOI: 10.1590/0104-9224/SI25.22. Citado na página 26.

CAYO, E. H. **Monitoramento, detecção e localização de defeitos na solda baseada no sensoriamento da pressão acústica do arco elétrico no processo GMAW-S**. 108 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia, Brasília/DF, 2008. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/1855>>. Citado na página 37.

- CORDEIRO, G. M. **Um algoritmo para cálculo da frequência de curto-circuito com e sem curtos incipientes**. 51 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora/MG, 2017. Disponível em: <<https://www.ufjf.br/mecanica/trabalhos/trabalho-de-conclusao-de-curso-monografias/>>. Citado na página 52.
- CORREA, C. A. **Aço inoxidável martensítico aplicado em revestimento pelo processo MIG pulsado e convencional**. 91 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas/SP, 2000. DOI: 10.47749/T/UNICAMP.2000.202213. Citado na página 23.
- CORREA, C. A. **Uma contribuição ao processo de soldagem de revestimento com arame tubular pulsado de um aço CA6NM aplicando o método Taguchi**. 120 p. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas/SP, 2018. DOI: 10.47749/T/UNICAMP.2018.995620. Citado 4 vezes, nas páginas 50, 64, 66 e 67.
- COSTA, G. M.; PEREIRA, E. C.; PARANHOS, R. P. d. R. Efeito da adição de propileno aos gases de proteção convencionais na soldagem GMAW aplicada a juntas de topo e ângulo. **Soldagem & Inspeção**, v. 24, n. e2426, p. 1–12, 2019. DOI: 10.1590/0104-9224/SI24.26. Citado na página 52.
- CRUZ, F. E. G. **Uma metodologia para monitoramento em tempo real dos modos de transferência de metal convencionais no processo de soldagem GMAW**. 113 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília/DF, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/37068>>. Citado na página 49.
- CUIURI, D.; NORRISH, J.; COOK, C. D. New approaches to controlling unstable gas metal arc welding. **Australasian Welding**, v. 47, n. 3, p. 39–47, 2002. Citado na página 39.
- DEVORE, J. L. **Probability and Statistics for Engineering and the Sciences**. Boston, MA/EUA: Cengage Learning, 2011. v. 8. 768 p. ISBN 978-0538733526. Citado na página 54.
- DI, X.; DENG, S.; WANG, B. Effect of pulse current on mechanical properties and dendritic morphology of modified medium manganese steel welds metal. **Materials & Design**, v. 66, p. 169–175, 2015. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.10.050. Citado na página 33.
- DÍAZ, V. V.; ACEVEDO, F. F.; CUNHA, T. V. Uma contribuição na determinação das variáveis da corrente contínua pulsada para o arame tubular E71T-1M. **Soldagem & Inspeção**, v. 23, n. 3, p. 340–349, 2018. DOI: 10.1590/0104-9224/SI2303.04. Citado na página 39.
- DONCASTER, C. P.; DAVEY, A. **Analysis of Variance and Covariance: How to choose and construct models for the life sciences**. 1. ed. Nova Iorque/EUA: Cambridge University Press, 2007. 287 p. ISBN 978-0-511-35593-6. Citado 2 vezes, nas páginas 55 e 56.
- DURAND, R. Z. S. **Avaliação da Microestrutura e Propriedades Mecânicas da Soldagem Circunferencial do Aço API 5L X80 por Processos de Soldagem Semi-Automáticos com Proteção Gasosa**. 143 p. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2007. DOI: 10.17771/PUCRio.acad.10959. Citado 2 vezes, nas páginas 38 e 85.
- DUTRA, J. Análise estatística de estabilidade de arco em soldagem MIG/MAG com transferência por curto-circuito. **Encontro Nacional de Tecnológica da Soldagem ABS, Anais... São Paulo: ABS**, v. 1, p. 327–347, 1989. Citado na página 50.

DUTRA, J. C.; MARQUES, C.; SILVA, R. H. G. e. Consonâncias e dissonâncias interpretativas no inter-relacionamento das variáveis da corrente pulsada aplicada à soldagem com arame de alumínio 4043. **Soldagem & Inspeção**, v. 17, n. 3, p. 201–209, 2012. DOI: 10.1590/S0104-92242012000300004. Citado 3 vezes, nas páginas 32, 41 e 76.

ESAB. **Apostila de soldagem MIG/MAG**. 1. ed. [S.l.]: ESAB BR, 2004. 68 p. Citado na página 22.

ESAB. **OK TUBROD 410NiMo MC. Especificações e Downloads**. 2006. Disponível em: <<https://www.esab.com.br/br/pt/products/filler-metals/gas-shielded-flux-cored-wires-fcaw/stainless-steel-wires/ok-tubrod-410nimo-mc.cfm>>. Acesso em: 08 jun. 2022. Citado na página 63.

ESAB. **Selecting the Mode of Transfer**. 2013. Disponível em: <<https://www.esabna.com/us/en/news/newsletters/july-2013/selecting-the-mode-of-transfer.cfm#:~:text=There%20are%20four%20basic%20modes,consumable%20that%20is%20being%20used.>> Acesso em: 27 abr. 2022. Citado na página 27.

ESSERS, W.; Van Gompel, M. R. M. Arc control with pulsed GMA welding. **Welding Journal**, v. 63, p. 26–32, 1984. Citado na página 47.

FARIAS, J. P. **Magnésio metálico como componente do revestimento na soldagem com eletrodos ao C-Mn-Ni**. 244 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 1993. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/157778>>. Citado 3 vezes, nas páginas 10, 52 e 53.

FARIAS, J. P. et al. Efeito da variação do gás e do tipo de corrente sobre o desempenho do arame tubular AWS E71T-1. **II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, João Pessoa/PB, p. 1–10, 2002. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/2523>>. Citado na página 53.

FERNANDES, D. B. et al. Ensaio para medição de nível e alcance de respingos em soldagem MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção**, v. 15, n. 2, p. 150–155, 2010. DOI: 10.1590/S0104-92242010000200009. Citado na página 52.

FERREIRA, G. R. B. et al. Uma metodologia para análise da distribuição de contagem dos picos de tensão de reignição para avaliação da estabilidade do processo GMAW curto-circuito. **Soldagem & Inspeção**, v. 24, p. 9, 2019. ISSN 0104-9224. DOI:10.1590/0104-9224/si24.07. Citado 2 vezes, nas páginas 50 e 52.

FERREIRA, J. G. **Estudo dos sinais elétricos no processo de soldagem por revestimento com arame tubular pulsado visando determinar a estabilidade do arco elétrico**. 95 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Cornélio Procópio/PR, 2022. Citado 2 vezes, nas páginas 67 e 85.

FILHO, A. J. B. **Análise dos parâmetros da polaridade negativa na curva de corrente de soldagem MIG/MAG polaridade variável aplicados à soldagem para revestimento**. 91 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RG, 2017. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/163419>>. Citado 2 vezes, nas páginas 42 e 69.

- FILHO, E. G. M. **Estudo da influência relativa das variáveis do processo de soldagem MIG-MAG (GMAW) no passe de raiz**. 86 p. Dissertação (Mestrado) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG, 2012. Citado na página 70.
- GERDAU. **Guia de Soluções para Soldagem com Arames MIG/MAG**. 2010. 14 p. Catálogo do Fabricante. Citado na página 45.
- GERDAU. **Aços Especiais para Construção mecânica**. 2020. Catálogo do Fabricante. Disponível em: <https://www2.gerdau.com.br/sites/default/files/2020-10/Tabela_Composicao_Quimica.pdf>. Citado na página 63.
- GHOSH, P. et al. Arc characteristics and behaviour of metal transfer in pulsed current GMA welding of stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, Elsevier, v. 209, p. 1262–1274, 2009. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2008.03.049. Citado na página 50.
- GHOSH, P. K. **Pulse current gas metal arc welding: Characteristics, control and applications**. Singapura/SGP: Springer, 2017. 322 p. ISSN 2195-092X. ISBN 978-981-10-3557-9. Citado 2 vezes, nas páginas 17 e 53.
- GOMES, B. J. C. et al. Efeito das condições operacionais de soldagem na geometria e ângulo de contato de uma junta soldada com eletrodo tubular autoprotetido. **IX Congresso de Engenharias da Universidade Federal de São João Del-Rei**, v. 2, p. 12, 2019. Citado na página 25.
- GUIMARÃES, J. B. **Estudo dos parâmetros de soldagem em um revestimento de aço martensítico 410 NiMo pelo processo FCAW pulsado utilizando modelos de regressão**. 99 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Cornélio Procópio/PR, 2020. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/5427>>. Citado 9 vezes, nas páginas 59, 67, 69, 70, 71, 72, 73, 74 e 99.
- HANZELKA, Z.; BIEN, A. **Guia de Aplicação de Qualidade de Energia: Harmônicas inter-harmônicas**. São Paulo/SP: Leonardo da Vinci Education and Culture, 2004. 24 p. Citado na página 82.
- HARDEO, S.; MOHAMMED, I. **The Analysis of Variance: Fixed, random and mixed models**. Nova Iorque/EUA: Springer Science+Business Media, 2000. 742 p. DOI: 10.1007/978-1-4612-1344-4. ISBN 978-1-4612-1344-4. Citado 2 vezes, nas páginas 54 e 55.
- HERMANS, M.; Den Ouden, G. Process behavior and stability in short circuit gas metal arc welding. **Welding Journal**, v. 78, p. 137–s, 1999. Citado na página 36.
- HINKLE, D. E.; WIERSMA, W.; JURIS, S. G. **Applied Statistics for the Behavioral Sciences**. 5. ed. Boston, MA/EUA: Houghton Mifflin, 2003. 756 p. ISBN 978-0618124053. Citado na página 68.
- HIRATA, Y. Pulsed arc welding. **Welding International**, v. 17, n. 2, p. 98–115, 2003. DOI:10.1533/wint.2003.3075. Citado na página 33.
- HU, S. et al. The arc characteristics of cold metal transfer welding with AZ31 magnesium alloy wire. **J. Manuf. Process**, v. 24, p. 298–306, 2016. DOI:10.1016/j.jmapro.2016.10.001. Citado na página 49.

IVANOV, O. et al. Researching of the structure and properties of FCAW hardfacing based on Fe-Ti-Mo-B-C welded under low current. **Procedia Structural Integrity**, v. 36, p. 223–230, 2022. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.01.028. Citado na página 26.

JEFFUS, L.; BOWER, L. **Welding: Skills, processes and practices for entry-level welders**. 1. ed. Clifton Park, Nova Iorque/EUA: Delmar Cengage Learning, 2010. v. 1. 348 p. ISBN 978-4354-2788-4. Citado 2 vezes, nas páginas 23 e 39.

JILUAN, P. **Arc Welding Control**. Boca Raton, FL/EUA: Elsevier Science, 2003. 624 p. (Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies). ISBN 9781855736870. Citado na página 17.

JONES, S. B. Procedure selection in submerged arc welding. **Submerged Arc Welding**, Cambridge: The Welding Institute, p. 37–42, 1978. Citado 2 vezes, nas páginas 35 e 36.

KAH, P.; SUORANTA, R.; MARTIKAINEN, J. Advanced gas metal arc welding processes. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.**, Springer, v. 67, p. 655–674, 2013. DOI: 10.1007/s00170-012-4513-5. Citado 2 vezes, nas páginas 30 e 31.

KHAN, M. I. **Welding science and technology**. New Delhi/IN: New Age International, 2009. 288 p. ISBN 978-81-224-2621-5. Citado 2 vezes, nas páginas 26 e 34.

KRISHNAN, S.; KULKARNI, D. V.; DE, A. Pulsed current gas metal arc welding of P91 steels using metal cored wires. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 229, p. 826–833, 2016. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.11.007. Citado na página 33.

KUMAR, R. K.; OMKUMAR, M. Ultrasonic welding of GF/PA6T composites: Experimental investigation and process optimization. **Materials Today: Proceedings**, v. 39, n. 4, p. 1180–1186, 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.462. Citado na página 61.

KUMAR, V.; ALBERT, S. K.; CHANDRASEKHAR, N. Signal processing approach on weld data for evaluation of arc welding electrodes using probability density distributions. **Measurement**, v. 133, p. 23–32, 2019. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.09.076. Citado na página 77.

KUOCH, S.; WARINSIRIRUK, E.; JOY-A-KA, S. Digitalized evaluation of welder skill by using cyclogram characteristics. **MATEC Web Conf.**, v. 269, n. 07004, p. 7, 2019. DOI: 10.1051/mateconf/201926907004. Citado 3 vezes, nas páginas 50, 51 e 95.

LANKIN, Y. N. Indicators of stability of the GMAW process. **The Paton Welding Journal**, v. 10, n. 1, p. 6–13, 2011. Disponível em: <<https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj/2011/01/01#x>>. Citado na página 17.

LERMEN, R. T. Influência da velocidade de soldagem sobre as geometrias dos cordões de solda realizados através dos processos de soldagem FCAW e soldagem híbrida (TIG/FCAW). **SIEF - Semana Internacional das Engenharias da FAHOR**, p. 1–10, 2011. Citado na página 46.

LOPERA, J. E. P.; ALFARO, S. C. A.; MOTTA, J. S. M. T. Modelagem empírica da transferência goticular projetada em processos de soldagem GMAW. **Soldagem & Inspeção**, v. 17, n. 4, p. 335–346, 2012. DOI: 10.1590/S0104-92242012000400008. Citado na página 49.

LUCAS, W.; IORDACHESCU, D.; PONOMAREV, V. Classification of metal transfer modes in GMAW. **IHW Doc.**, p. 1859–05, 2005. Citado na página 28.

MACHADO, I. G. **Soldagem & técnicas conexas: processos**. Porto Alegre/RS: Ed. do Autor, 1996. 477 p. Citado 2 vezes, nas páginas 17 e 23.

MACHADO, M. V. R. et al. Determinação do índice de regularidade da transferência metálica por curto-circuito via monitoramento sonoro. In: **7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. Penedo, Itatiaia/RJ: ABCM, 2013. p. 9. Citado na página 52.

MANIKANDAN, M. et al. Optimization of the pulse current gas tungsten arc welding process parameters for alloy C-276 using the Taguchi method. **Procedia Engineering**, v. 97, p. 767–774, 2014. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.307. Citado na página 61.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte/MG: Editora UFMG, 2009. 363 p. ISBN 978-8570417480. Citado na página 27.

MATERIAL WELDING. **Metal Transfer Mode in GMAW, FCAW & SMAW Welding**. 2023. Disponível em: <https://www.materialwelding.com/metal-transfer-mode-in-gmaw-fcaw-smaw/#What_is_Spray_Transfer_mode_in_MIG-MAG_GMAW>. Acesso em: 05 abr. 2023. Citado na página 28.

MAZZAFERRO, J. A. E. **Estudo da estabilidade do arco elétrico na soldagem subaquática com eletrodos revestidos**. 242 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre/RS, 1998. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/171818>>. Citado na página 47.

MILONE, G. **Estatística geral e aplicada**. 1. ed. São Paulo/SP: Cengage Learning, 2003. 498 p. Citado na página 56.

MINITAB. **Tabela resumo do modelo de ajuste do modelo de regressão**. 2023. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/20/help-and-how-to/statistical-modeling/regression/how-to/fit-regression-model/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/model-summary-table/#fntarg_1>. Acesso em: 13 jul. 2023. Citado na página 59.

MODENESI, P. J. **Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais**. Belo Horizonte/MG: Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 150 p. Citado 6 vezes, nas páginas 29, 30, 37, 45, 85 e 88.

MOREIRA, A. F. **Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido através dos processos de soldagem GMAW e FCAW**. 146 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de São Paulo, Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira/SP, 2008. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/94492>>. Citado 2 vezes, nas páginas 43 e 44.

MORENO, J. R. S. Estudo do revestimento depositado sobre o aço SAE 1020 através do processo de soldagem FCAW usando arame tubular 410 NiMo. **Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos**, São Carlos/SP, p. 65, 2017. Citado na página 69.

MOTA, C. P. et al. Sistema de visão por infravermelho próximo para monitoramento de processos de soldagem a arco. **Soldagem & Inspeção**, v. 8, n. 1, p. 19–30, 2013. DOI: 10.1590/S0104-92242013000100004. Citado na página 49.

MUÑOZ, J. J. C.; CARVALHO, G. C. d.; ALFARO, S. C. Obtenção de parâmetros em soldagem GMAW-pulsado, usando-se critérios de desenvolvimento de transferência metálica, aplicados na recuperação de pás de turbinas. In: **ABCM Symposium**

- Series in Mechatronics**. ABCM, 2014. v. 6, n. 2, p. 1252–1262. Disponível em: <https://abcm.org.br/pages/abcm_symposium_series_in_mechatronics_vol_6>. Citado na página 78.
- NASCIMENTO, G. M. S. d.; PUKASIEIWCZ, A. G. M. Análise do processo de deposição FCAW de uma liga de carboneto de cromo aplicando o planejamento experimental central composite circumscribed. **Soldagem & Inspeção**, v. 21, n. 4, p. 444–455, 2016. DOI: 10.1590/0104-9224/SI2104.05. Citado 2 vezes, nas páginas 25 e 69.
- NATALIE, C. A.; OLSON, D. L.; BLANDER, M. Physical and chemical behaviour of welding fluxes. **Annual Review of Materials Science**, v. 16, n. 1, p. 389–413, 1986. DOI: 10.1146/annurev.ms.16.080186.002133. Citado na página 21.
- NETER, J.; WASSERMAN, W.; KUTNER, M. H. **Applied Linear Regression Models**. Homewood, IL/EUA: Richard D. Irwin, Inc., 1983. 547 p. ISBN 0-256-02547-9. Citado 4 vezes, nas páginas 56, 57, 58 e 59.
- NEVES, A. C. et al. Estudo da estabilidade de uma soldagem de revestimento utilizando processo FCAW pulsado através da avaliação de oscilogramas de corrente e tensão. In: **XXVI SEI-SICITE**. Guarapuava/PR: UTFPR, 2021. p. 1–6. Citado 4 vezes, nas páginas 49, 52, 95 e 99.
- NEVES, A. C. et al. Study of arc welding stability in flux cored arc welding process and pulsed continuous current. **Welding International**, Taylor & Francis, v. 35, n. 4-6, p. 158–169, 2021. DOI: 10.1080/09507116.2021.1971936. Citado 6 vezes, nas páginas 17, 52, 77, 79, 95 e 99.
- NOGUEIRA, R. M. U.; BOHÓRQUEZ, C. E. N.; ZANELLA, I. G. Comparação da estabilidade do arco e da variabilidade da geometria de soldas obtidas pelos processos MIG/MAG e arame tubular. **Soldagem & Inspeção**, v. 20, n. 2, p. 191–204, 2015. DOI: 10.1590/0104-9224/SI2002.07. Citado 2 vezes, nas páginas 26 e 39.
- NORRISH, J. **Advanced Welding Processes**. Amsterdam/NL: Woodhead Publishing, 2006. 304 p. (Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies). DOI:10.1533/9781845691707.1. ISBN 978-1-84569-130-1. Citado na página 23.
- OGUNBIYI, B.; NORRISH, J. Monitoring indices for metal transfer in the GMAW process. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 2, p. 33–35, 1997. ISSN 1743-2936. DOI: 10.1179/stw.1997.2.1.33. Citado na página 17.
- PESSOA, A. R. P. et al. Seleção dos parâmetros através dos custos de soldagem para aplicação de revestimento com ligas de níquel depositadas pelo processo MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção**, v. 16, n. 1, p. 71–78, 2011. DOI:10.1590/S0104-92242011000100009. Citado na página 24.
- PHADKE, M. S. **Quality Engineering Using Robust Design**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1989. 250 p. ISBN 978-0137451678. Citado na página 66.
- PIĄTKOWSKI, T.; MARMOŁOWSKI, A. Significance of electrode stick-out when welding with flux-cored wires. **Welding International**, v. 26, n. 9, p. 703–706, 2011. DOI: 10.1080/09507116.2011.592683. Citado na página 37.
- PINTO, J. E. et al. Uso da técnica de "perfilografia" para visualização dos modos de transferência metálica no processo de soldagem GMAW usando uma câmera CMOS de alta velocidade. In: **6º COBEF**. Caxias do Sul/RS: ABCM, 2011. p. 10. Citado 2 vezes, nas páginas 17 e 49.

- POSINASETTI, P.; KANG, M.-J.; YARLAGADDA, P. K. Behaviour of metal transfer modes in pulse gas metal arc welding of aluminum. In: **Advanced Materials Processing Technologies Conference**. Las Vegas, NV/EUA: Qut Eprints, 2006. p. 1–8. Disponível em: <<https://eprints.qut.edu.au/6155/>>. Citado na página 76.
- PRAVEEN, P.; KANG, M. J.; YARLAGADDA, K. D. V. P. Characterization of dynamic behaviour of short circuit in pulsed gas metal arc welding of aluminum. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v. 14, n. 1-2, p. 75–82, 2006. ISSN 1734-8412. Citado na página 37.
- PRAVEEN, P.; KANG, M. J.; YARLAGADDA, P. K. D. V. Drop transfer mode prediction in pulse GMAW of aluminum using statistical model. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 201, p. 502–506, 2008. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.11.226. Citado na página 91.
- PYO, C. et al. A study on the enhanced process of elaborate heat source model parameters for flux cored arc welding of 9% nickel steel for cryogenic storage tank. **J. Mar. Sci. Eng.**, v. 10, n. 12, p. 1810, 2022. DOI: 10.3390/jmse10121810. Citado na página 18.
- QUINTINO, L.; ALLUM, C. J. Pulsed GMAW: Interactions between process parameters. – I. **Weld. Met. Fabr.**, v. 52, n. 2, p. 85–89, 1984. Citado 2 vezes, nas páginas 40 e 41.
- RAMOS, E. G. **Análise da oscilação da poça de solda em GMAW por meio de processamento de imagens obtidas por perfilografia**. 98 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília/DF, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/10181>>. Citado 2 vezes, nas páginas 79 e 82.
- REZENDE, G. M. C. d. et al. Um critério para determinar a regulagem da tensão em soldagem MIG/MAG por curto-circuito. **Soldagem & Inspeção**, v. 16, n. 2, p. 98–103, 2011. DOI: 10.1590/S0104-92242011000200002. Citado 2 vezes, nas páginas 17 e 51.
- ROCHA, V. S.; SILVA, C. L. M. d.; FARIAS, J. P. Sistema rutílico AWS E6013 modificado: efeito do tipo de fonte de energia e da basicidade da escória. In: **CONEN 2000**. Natal/RN: ABCM, 2000. p. 1–9. Citado na página 53.
- RODRÍGUEZ, A. G.; ORIA, J. V. M.; GÓMEZ, A. D. Theoretical and empirical assessment of evaluation methods of the electric charge transference in welding with covered electrodes. **Welding International**, v. 30, n. 7, p. 527–534, 2016. DOI: 10.1080/09507116.2015.1096525. Citado na página 53.
- SAE INTERNATIONAL. **J444 - Cast shot and grit size specifications for peening and cleaning**. 7. ed. [S.l.], 2017. 5 p. Citado na página 62.
- SALES, J. C. **Efeito do tipo de gás de proteção sobre o desempenho do arame tubular AWS E71T-1, utilizando processos convencional e pulsado**. 78 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Fortaleza/CE, 2002. Citado na página 53.
- SANTOS, T. dos; DUTRA, J. C. Abertura do arco MIG do alumínio. **Soldagem & Inspeção**, v. 14, n. 2, p. 122–130, 2009. DOI: 10.1590/S0104-92242009000200004. Citado na página 74.
- SARTORI, J. R. S. Characterization of welding parameters and microstructure in a coating made with a tubular electrode of SAE EC410NiMo on a SAE 1020 steel substrate by FCAW process. **Microscopy and Analysis (Wiley)**, v. 159, p. 16–18, 2019. Disponível em: <<https://analyticalscience.wiley.com/do/10.1002/micro.2788>>. Citado na página 26.

SAVI, B. M. **Desenvolvimento tecnológico para soldagem MIG de ligas de alumínio 5083 H116**. 101 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis/SC, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/123364>>. Citado na página 41.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. 2. ed. São Paulo/SP: Artliber, 2008. 70 p. ISBN 9788588098428. Citado 4 vezes, nas páginas 17, 38, 46 e 77.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V.; LUCAS, W. A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, p. 1406–1413, 2012. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.01.021. Citado 2 vezes, nas páginas 27 e 28.

SHI, Y. et al. Evaluation method of pulsed MIG welding of aluminum alloy based on probability density of arc voltage signal. **Transactions of the China Welding Institution, Papers**, v. 31, n. 5, p. 13–16, 2010. Citado na página 90.

SILVA, E. F. et al. Flutuação de tensão e inter-harmônicas no processo de soldagem MIG pulsado. In: **Sociedade Brasileira de Qualidade da Energia Elétrica**. Cuiabá/MT: CBQEE, 2011. v. 9, p. 260–265. Citado na página 82.

SILVA, R. H. G. et al. Assessing the effects of solid wire electrode extension (stick out) increase in MIG/MAG welding. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 40, p. 1–7, 2018. DOI: 10.1007/s40430-017-0948-9. Citado na página 37.

SILVA, R. Z. d. et al. Análise inteligente de modos de transferência metálica em soldagem GMAW a partir de visão computacional. In: **Sociedade Brasileira de Automática**. Porto Alegre/RS: SBA, 2017. p. 1410–1415. ISSN 2175-8905. Citado na página 49.

SOUSA, J. M. S. d.; LOBATO, M. Q.; GARCIA, D. N. Abrasion resistance of Fe-Cr-C coating deposited by FCAW welding process. **Wear**, v. 476, p. 203688, 2021. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203688. Citado na página 26.

SOUZA, D. **Levantamento de mapas operacionais de transferência metálica para soldagem MIG/MAG de aço ao carbono na posição plana**. 169 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia/MG, 2010. Citado na página 17.

SOUZA, D. et al. Influência da regulagem de parâmetros de soldagem sobre a estabilidade do processo MIG/MAG operando em curto-circuito. **Soldagem & Inspeção**, v. 16, n. 1, p. 22–32, 2011. DOI: 10.1590/S0104-92242011000100004. Citado na página 52.

SOUZA, D. et al. Influência da tensão de soldagem e do gás de proteção sobre a correlação entre indutância e regularidade da transferência metálica na soldagem MIG/MAG por curto-circuito. **Soldagem & Inspeção**, v. 16, n. 2, p. 114–122, 2011. DOI: 10.1590/S0104-92242011000200004. Citado na página 52.

SOUZA, D. D. B. G. d.; FERRARESI, V. A. Aplicação de revestimento duro utilizando o processo FCAW duplo arame para diferentes tipos de consumíveis utilizados na indústria sucroalcooleira. **Revista Matéria**, v. 22, n. 1, p. 14, 2017. DOI: 10.1590/S1517-707620170001.0126. Citado na página 26.

STARLING, C. M. D.; MODENESI, P. J. Metal transfer evaluation of tubular wires. **Welding International**, v. 21, p. 412–420, 2007. DOI: 10.1080/09507110701510832. Citado na página 29.

STEFFENS, C. R. et al. Sistema de aquisição de imagem e medição das variáveis do processo para avaliação de deposição de solda. In: **Sociedade Brasileira de Automática**. João Pessoa/PB: SBA, 2019. v. 1, n. 1. ISSN 2525-8311. Citado na página 49.

SUBAN, M.; TŮSEK, J. Methods for the determination of arc stability. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 143-144, p. 430–437, 2003. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00416-3. Citado na página 50.

SUBRAMANIAM, S. et al. Droplet transfer in pulsed gas metal arc welding of aluminum. **Welding Journal**, Nova Iorque/EUA, v. 77, p. 458–s, 1998. Citado 2 vezes, nas páginas 35 e 90.

SUBRAMANIAM, S. et al. Experimental approach to selection of pulsing parameters in pulsed GMAW. **Welding Journal**, v. 78, p. 166–s, 1999. Citado na página 39.

TEIXEIRA, G. S.; MAZZAFERRO, J. A. E. GMA welding metal transfer mode study by high-speed imaging and electrical signal acquisition. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 41, n. 8, p. 1–12, 2019. DOI:10.1007/s40430-019-1814-8. Citado 2 vezes, nas páginas 29 e 49.

TEREZA, C. et al. Avaliação comparativa entre análises quantitativas automatizada e manual aplicadas sobre imagens de transferência metálica em soldagem MIG/MAG. In: **Anais do 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. Uberlândia/MG: FEMEC - UFU, 2003. p. 1–12. Citado na página 49.

TRINH, N. Q. et al. Effects of alkaline elements on the metal transfer behavior in metal cored arc welding. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 68, p. 1448–1457, 2021. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.06.061. Citado na página 29.

URIBE, A. M. M. et al. Influence of polarity on the stability of underwater wet welding process with coated electrode. **Soldagem & Inspeção**, v. 22, n. 4, p. 429–441, 2017. DOI: 10.1590/0104-9224/SI2204.13. Citado na página 50.

VALLE, R. R. d. C. Influência dos parâmetros de soldagem na morfologia do cordão de solda em revestimento com corrente pulsada. Cornélio Procópio/PR, p. 33, 2017. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/27449>>. Citado na página 26.

VEDRTNAM, A.; SINGH, G.; KUMAR, A. Optimizing submerged arc welding using response surface methodology, regression analysis, and genetic algorithm. **Defence Technology**, v. 14, n. 3, p. 204–212, 2018. Citado na página 61.

VIEGAS, D. B. **Avaliação da resistência ao desgaste de um aço Hardox 450 submetido a solda de revestimento duro com arame tubular DIN 855/MF-10-GF-60-GR utilizando o processo FCAW**. 104 p. Dissertação (Mestrado) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG, 2016. Disponível em: <<https://www.posmat.cefetmg.br/82-2/>>. Citado na página 26.

VILARINHO, L. O. **Desenvolvimento e avaliação de um algoritmo alternativo para soldagem MIG sinérgica de alumínio**. 121 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 2000. DOI: 10.14393/ufu.di.2000.14. Citado na página 41.

WANG, G.; HUANG, P. G.; ZHANG, Y. M. Numerical analysis of metal transfer in gas metal arc welding under modified pulsed current conditions. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 35, n. 5, p. 857–866, 2004. DOI: 10.1007/s11663-004-0080-y. Citado 2 vezes, nas páginas 38 e 40.

WANG, L. et al. Backward flowing molten metal in weld pool and its influence on humping bead in high-speed GMAW. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 237, p. 342–350, 2016. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.06.028. Citado na página 49.

WELDING TECH. **What is a Short Circuiting Transfer in welding?** 2019. Disponível em: <<https://weldingtech.net/short-circuiting-transfer/>>. Acesso em: 05 abr. 2023. Citado na página 27.

WELDING TECH. **What is the Globular Transfer in Welding?** 2019. Disponível em: <https://weldingtech.net/globular-transfer/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=globular-transfer#750>. Acesso em: 05 abr. 2023. Citado na página 28.

XU, Y. et al. Computer vision technology for seam tracking in robotic GTAW and GMAW. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 32, p. 25–36, 2015. DOI: 10.1016/j.rcim.2014.09.002. Citado na página 49.

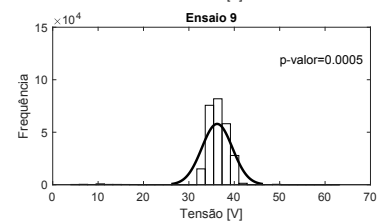
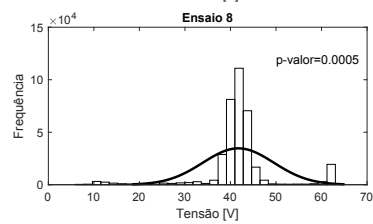
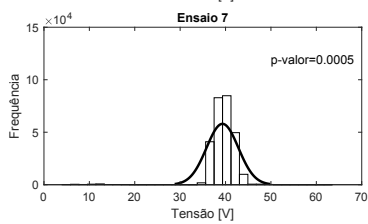
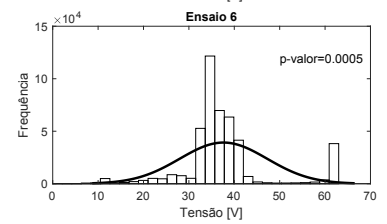
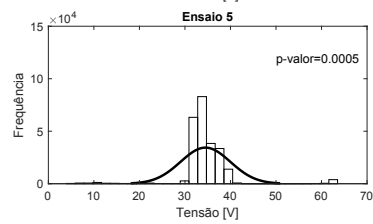
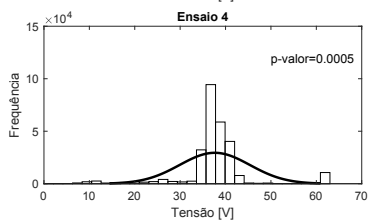
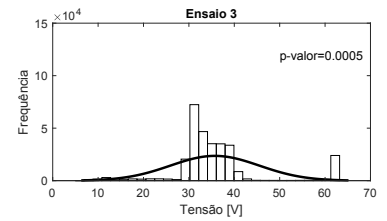
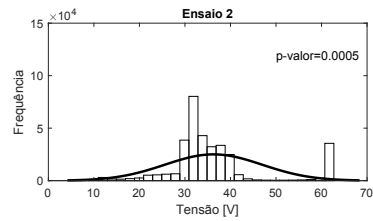
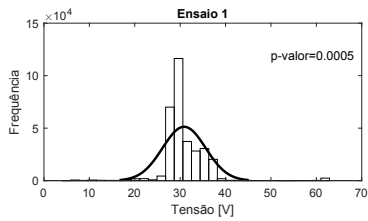
YAMADA, M.; HOSOOKA, A.; OGATA, R. Method and apparatus for detecting abnormality in high frequency electric welding. **Nippon Steel Corp.**, n. JPS5714482A, 1994. Citado na página 76.

YANG, J. et al. Numerical analysis of arc parameters and droplet behaviors for underwater flux-cored arc welding. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 194, p. 108601, 2023. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2023.108601. Citado na página 18.

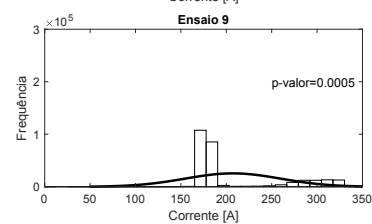
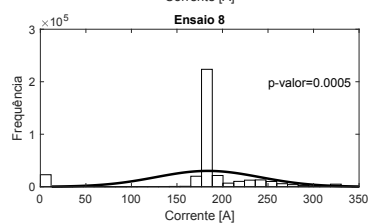
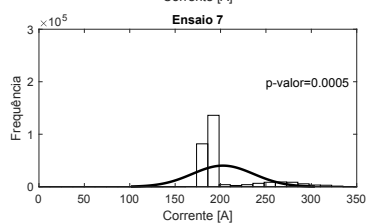
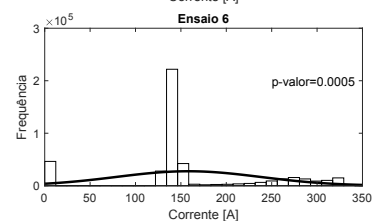
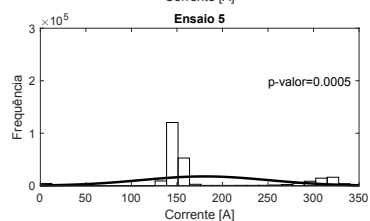
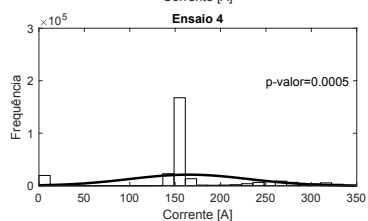
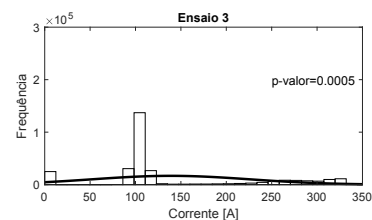
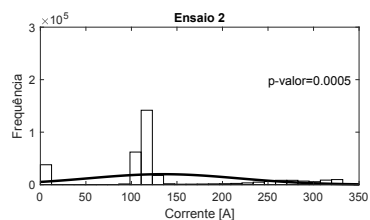
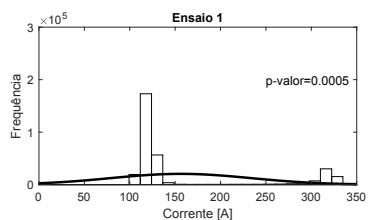
YAO, P. et al. Exploration of weld bead forming rule during double-pulsed GMAW process based on grey relational analysis. **Materials**, v. 12, n. 22, p. 3662, 2019. DOI: 10.3390/ma12223662. Citado na página 94.

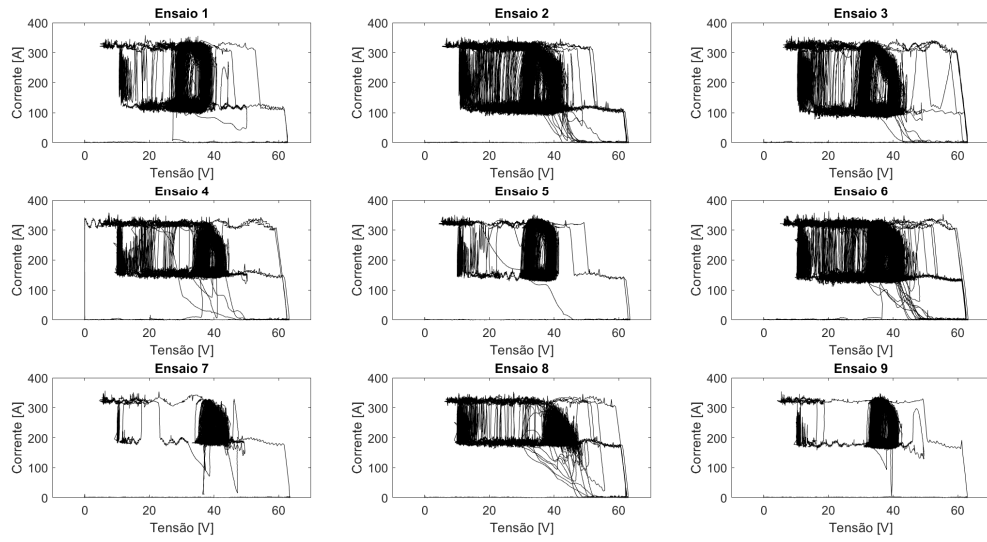
ZHANG, Y. et al. Correlation analysis of penetration based on keyhole and plasma plume in laser welding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 256, p. 1–12, 2018. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.01.032. Citado na página 61.

APÊNDICE A – HISTOGRAMAS E CURVA DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL DOS DADOS DE TENSÃO



APÊNDICE B – HISTOGRAMAS E CURVA DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL DOS DADOS DE CORRENTE



APÊNDICE C – CICLOGRAMAS DE POTÊNCIA DOS ENSAIOS

**APÊNDICE D – RESULTADOS DE CORRENTE, POTÊNCIA E TENSÃO MÉDIA
DOS ENSAIOS**

Parâmetros de ensaio	Resultados Obtidos						
	Amostra	\bar{V} [V]	σ_V [V]	I_m [A]	σ_I [A]	P [kW]	σ_P [kW]
$I_m = 170$ A $f_p = 23,26$ Hz $\nu = 300$ mm/min DBCP = 30 mm	1	30,865	0,609	159,491	0,478	4,976	0,066
$I_m = 170$ A $f_p = 26,32$ Hz $\nu = 350$ mm/min DBCP = 35 mm	2	33,925	0,110	150,387	1,381	5,132	0,023
$I_m = 170$ A $f_p = 30,30$ Hz $\nu = 400$ mm/min DBCP = 40 mm	3	33,655	0,395	153,843	7,321	5,094	0,057
$I_m = 200$ A $f_p = 23,26$ Hz $\nu = 350$ mm/min DBCP = 40 mm	4	35,962	2,735	178,085	4,997	6,402	0,464
$I_m = 200$ A $f_p = 26,32$ Hz $\nu = 400$ mm/min DBCP = 30 mm	5	34,039	0,137	186,209	1,327	6,288	0,009
$I_m = 200$ A $f_p = 30,30$ Hz $\nu = 300$ mm/min DBCP = 35 mm	6	35,839	0,271	176,341	0,836	6,335	0,033
$I_m = 230$ A $f_p = 23,26$ Hz $\nu = 400$ mm/min DBCP = 35 mm	7	39,911	0,386	200,334	1,513	8,048	0,074
$I_m = 230$ A $f_p = 26,32$ Hz $\nu = 300$ mm/min DBCP = 40 mm	8	42,101	0,337	191,882	2,804	8,127	0,050
$I_m = 230$ A $f_p = 30,30$ Hz $\nu = 350$ mm/min DBCP = 30 mm	9	36,241	0,479	207,272	4,696	7,535	0,069

APÊNDICE E – RESULTADOS MÉDIOS DOS ÍNDICES DE VERIFICAÇÃO DE ESTABILIDADE

Parâmetros de Ensaio	Resultados Obtidos						
	Ensaio	F_{cc} [s^{-1}]	F_{tm} [s^{-1}]	R_{cc}	IV_{cc}	Picos/s	A_{ciclo} [pixels]
$I_m = 170 A$ $f_p = 23,26 Hz$ $\nu = 300 mm/min$ DBCP = 30 mm	1	24,534 $\pm 0,015$	94,043 $\pm 8,007$	188,203 $\pm 239,825$	0,190 $\pm 0,121$	25,5 $\pm 1,00$	75242,00 $\pm 4855,09$
$I_m = 170 A$ $f_p = 26,32 Hz$ $\nu = 350 mm/min$ DBCP = 35 mm	2	27,788 $\pm 0,022$	84,515 $\pm 15,566$	12,650 $\pm 18,373$	0,237 $\pm 0,197$	28,0 $\pm 0,00$	74651,75 $\pm 2502,13$
$I_m = 170 A$ $f_p = 30,30 Hz$ $\nu = 400 mm/min$ DBCP = 40 mm	3	31,913 $\pm 0,034$	93,907 $\pm 3,969$	18,397 $\pm 29,295$	0,154 $\pm 0,037$	32,5 $\pm 1,00$	83450,50 $\pm 4068,18$
$I_m = 200 A$ $f_p = 23,26 Hz$ $\nu = 350 mm/min$ DBCP = 40 mm	4	31,950 $\pm 0,054$	94,196 $\pm 1,713$	171,991 $\pm 85,509$	0,216 $\pm 0,081$	26,0 $\pm 1,63$	82776,50 $\pm 9828,57$
$I_m = 200 A$ $f_p = 26,32 Hz$ $\nu = 400 mm/min$ DBCP = 30 mm	5	28,708 $\pm 4,769$	77,017 $\pm 13,157$	3,263 $\pm 0,077$	1,155 $\pm 0,623$	28,5 $\pm 1,00$	75577,25 $\pm 5376,26$
$I_m = 200 A$ $f_p = 30,30 Hz$ $\nu = 300 mm/min$ DBCP = 35 mm	6	29,301 $\pm 3,118$	100,076 $\pm 13,665$	7,608 $\pm 8,265$	0,371 $\pm 0,382$	32,0 $\pm 0,00$	83208,25 $\pm 6843,91$
$I_m = 230 A$ $f_p = 23,26 Hz$ $\nu = 400 mm/min$ DBCP = 35 mm	7	28,521 $\pm 6,238$	60,264 $\pm 10,584$	1,564 $\pm 0,37$	1,699 $\pm 0,537$	23,5 $\pm 3,00$	56008,00 $\pm 10508,75$
$I_m = 230 A$ $f_p = 26,32 Hz$ $\nu = 300 mm/min$ DBCP = 40 mm	8	37,310 $\pm 9,083$	71,606 $\pm 12,213$	21,669 $\pm 37,616$	1,312 $\pm 0,32$	19,5 $\pm 1,00$	92435,75 $\pm 6530,13$
$I_m = 230 A$ $f_p = 30,30 Hz$ $\nu = 350 mm/min$ DBCP = 30 mm	9	91,684 $\pm 72,027$	171,883 $\pm 107,705$	2,290 $\pm 1,452$	2,797 $\pm 1,355$	32,0 $\pm 1,63$	68831,50 $\pm 9564,34$

APÊNDICE F – ANÁLISES DE VARIÂNCIA DOS ÍNDICES DE FACILIDADE E REGULARIDADE DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-CIRCUITO

Tabela 42 – Resultados da ANOVA para a equação de regressão da variável F_{cc} .

Fonte	GL	SQ Seq.	Contr.	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Fator F	P-valor
Regressão	4	8114,8	27,09%	8114,8	2028,70	2,88	0,039
I_m	1	3580,0	11,59%	3580,0	3580,03	5,08	0,031
f_p	1	3255,9	10,87%	3255,9	3255,89	4,62	0,039
ν	1	2,7	0,01%	2,7	2,68	0,00	0,951
DBCP	1	1276,2	4,26%	1276,2	1276,19	1,81	0,188
Erro	31	21837,8	72,91%	21837,8	704,45		
Falta de ajuste	4	5812,6	19,41%	5812,6	1453,15	2,45	0,070
Erro puro	27	16025,2	53,50%	16025,2	593,53	—	—
Total	35	29952,6	100,00%				

Tabela 43 – Resultados da ANOVA para a equação de regressão da variável F_{tm} .

Fonte	GL	SQ Seq.	Contr.	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Fator F	P-valor
Regressão	4	16228,4	23,14%	16228,4	4057,1	2,33	0,078
I_m	1	652,6	0,93%	652,6	652,6	0,38	0,545
f_p	1	10162,1	14,49%	10162,1	10162,1	5,85	0,022
ν	1	795,2	1,13%	795,2	795,2	0,46	0,504
DBCP	1	4618,6	6,59%	4618,6	4618,6	2,66	0,113
Erro	31	53893,0	76,86%	53893,0	1738,5		
Falta de ajuste	4	16253,3	23,18%	16253,3	4063,35	2,91	0,040
Erro puro	27	37639,7	53,68%	37639,7	1394,1	—	—
Total	35	70121,4	100,00%				

Tabela 44 – Resultados da ANOVA para a equação de regressão da variável R_{cc} .

Fonte	GL	SQ Seq.	Contr.	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Fator F	P-valor
Regressão	4	118173	30,66%	118173	29543,3	3,43	0,020
I_m	1	25020	6,49%	25020	25020,2	2,90	0,098
f_p	1	67773	17,58%	67773	67772,8	7,86	0,009
ν	1	25157	6,53%	25157	25157,0	2,92	0,098
DBCP	1	223	0,06%	223	223,3	0,03	0,873
Erro	31	267260	69,34%	267260	8621,3		
Falta de ajuste	4	64733	16,79%	64733	1618,3	2,16	0,101
Erro puro	27	202527	52,55%	202527	7501,0	—	—
Total	35	385433	100,00%				