

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

JEFERSON GONÇALVES FERREIRA

**ESTUDO DOS SINAIS ELÉTRICOS NO PROCESSO DE SOLDAGEM POR
REVESTIMENTO COM ARAME TUBULAR PULSADO VISANDO
DETERMINAR A ESTABILIDADE DO ARCO ELÉTRICO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2022

JEFERSON GONÇALVES FERREIRA

**ESTUDO DOS SINAIS ELÉTRICOS NO PROCESSO DE SOLDAGEM POR
REVESTIMENTO COM ARAME TUBULAR PULSADO VISANDO
DETERMINAR A ESTABILIDADE DO ARCO ELÉTRICO**

**Study of Electrical Signals in the Process of Coating Welding With Pulsed
Tubular Wire Aiming to Determine the Stability of the Electric Arc**

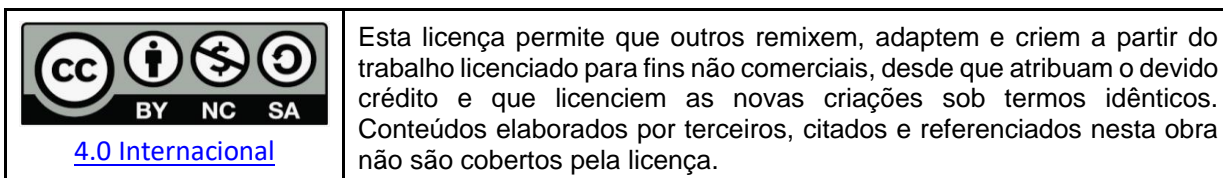
Dissertação de Mestrado apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Cornélio Procópio

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Sartori Moreno.

Co-orientador: Prof. Dr. Celso Alves Corrêa.

CORNÉLIO PROCÓPIO

2022





Título da Dissertação Nº 56

Estudo dos Sinais Elétricos no Processo de Soldagem por Revestimento com Arame Tubular Pulsado Visando Determinar a Estabilidade do Arco Elétrico

por

Jeferson Gonçalves Ferreira

Orientador: Prof. Dr. Joao Roberto Sartori Moreno

Coorientador: Prof. Dr. Celso Alves Corrêa

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA – Área de Concentração: Ciências Mecânicas, Linha de Pesquisa: Caracterização dos Materiais, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Cornélio Procópio, às 16 horas do dia 11 de maio de 2022. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:

Prof. Dr. João Roberto Sartori Moreno
(Orientador – UTFPR-CP)

Prof. Dr. Celso Alves Corrêa
(Coorientador - UTFPR-CP)

Prof. Dr. Paulo Cezar Tulio
(UTFPR-CP)

Prof. Dr. Marcos Gonçalves Júnior
(IFMG - Arcos)

Visto da coordenação: _____

Prof. Dr. Thiago Antonini Alves
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
UTFPR

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Programa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre me guiar, sempre estar presente em minha vida e me amar. Mostrando-me seu imenso carinho em tantos momentos da minha vida e sempre me fortalecendo para que consiga alcançar todos os meus objetivos.

Aos meus orientadores, João Roberto Sartori Moreno e Celso Alves Corrêa que sempre tiveram muita calma e disponibilidade, dando todo suporte necessário para a conclusão dessa pesquisa. E agradeço também aos professores que aceitaram o convite para participar da banca da minha defesa.

Agradeço aos meus pais, Genesio e Ivanil pelos conselhos e esforços e pelo infinito amor e incentivo que me fizeram chegar até neste momento.

Agradeço a minha namorada, Mirian, que sempre me incentivou e me apoiou para a realização dos meus ideais, encorajando-me a enfrentar todos os momentos difíceis da vida.

Agradeço aos meus amigos, pelo apoio, incentivo e ajuda constante, sem o qual não poderia ter atingido o sucesso que obtive no desenvolvimento deste trabalho.

" Quanto maior o conhecimento,
menor o ego.
Quanto maior o ego
menor o conhecimento."

Albert Einstein

RESUMO

FERREIRA, Jeferson Gonçalves. **Estudo dos sinais elétricos no processo de soldagem por revestimento com arame tubular pulsado visando determinar a estabilidade do arco elétrico**. 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2022.

A presente dissertação tem por objetivo analisar os sinais do arco elétrico no processo de soldagem por revestimento com arame tubular pulsado, com metal base SAE 1020 e metal de adição AWS EC410NiMo MC com diâmetro de 1,2mm, onde foram obtidos de forma simultânea os sinais da corrente, tensão e aceleração. As variáveis de influência adotadas foram a corrente média, a frequência de pulsação, a velocidade de soldagem e a distância bico contato peça, sendo cada variável testada em três níveis diferentes. Como variáveis de respostas foram analisadas a aceleração, frequência de pulsação obtida, quantidade de picos, potência e amplitude da aceleração. Portanto, para atingir o propósito do trabalho, foram utilizadas algumas ferramentas estatísticas, na primeira fase, foi empregado o método de Taguchi, para estabelecer quais as combinações de parâmetros seriam executadas em cada ensaio, nos fornecendo uma matriz L9. Na segunda fase, foi utilizada a análise de variância para comprovar estatisticamente qual parâmetro de soldagem exerceu influência nas variáveis de respostas, onde foi possível verificar que a corrente média afetou as variáveis de respostas da (aceleração, potência e amplitude da aceleração), a frequência de pulsação afetou as de variáveis de respostas da (aceleração, frequência de pulsação obtida e quantidade picos) a velocidade de soldagem afetou as variáveis (aceleração, potência e amplitude da aceleração) e a distância bico de contato peça não afetou nenhuma das variáveis. Analisando os valores encontrados pelos sinais, foi possível observar que a corrente média de 230 A apresentou uma menor aceleração RMS, ficando entre 0,140 a 0,172 m/s² e conseqüentemente uma melhor estabilidade do sistema. Utilizando a análise de Fourier foram identificadas as frequências dos três sinais, e também analisada a quantidade de picos para verificar o sincronismo.

Palavras Chave: Análise de Fourier, Arame Tubular Pulsado, Estabilidade do Arco Elétrico, Processamento de Sinais, 410 NiMo.

ABSTRACT

FERREIRA, Jeferson Gonçalves. **Study of electrical signals in the process of coating welding with pulsed tubular wire aiming to determine the stability of the electric arc.** 95f. Dissertation (Master's Degree in Mechanical Engineering) - Mechanical Engineering Postgraduate Program, Federal University of Technological Paraná, Cornélio Procópio, 2022.

This dissertation aims to analyze the electric arc signals in the process of coating welding with pulsed tubular wire, with SAE 1020 base metal and AWS EC410NiMo MC filler metal with 1.2mm diameter, where the signals were obtained simultaneously of current, voltage and acceleration. The influencing variables adopted were the average current, the pulse frequency, the welding speed and the nozzle-to-piece distance, each variable being tested at three different levels. As response variables, acceleration, pulse frequency obtained, number of peaks, power and amplitude of acceleration were analyzed. Therefore, to achieve the purpose of the work, some statistical tools were used, in the first phase, the Taguchi method was used, to establish which combinations of parameters would be performed in each trial, providing us with an L9 matrix. In the second phase, analysis of variance was used to statistically prove which welding parameter influenced the response variables, where it was possible to verify that the average current affected the response variables (acceleration, power and amplitude of acceleration). the pulsation frequency affected the response variables (acceleration, pulse frequency obtained and peak quantity), the welding speed affected the variables (acceleration, power and acceleration amplitude) and the contact tip distance did not affect any of the variables. Analyzing the values found by the signals, it was possible to observe that the average current of 230 A presented a lower acceleration RMS, remaining between 0.140 and 0.172 m/s² and, consequently, a better stability of the system. And using Fourier analysis, the frequencies of the three signals were identified, and the number of peaks was also analyzed to verify synchronism.

Keywords: Fourier Analysis, Pulsed Tubular Wire, Electric Arc Stability, Signal Processing, 410 NiMo.

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

A	Ampere (unidade de medição de corrente elétrica)
ANOVA	Análise de Variância
ASME	American Society Materials Engineering
ASTM	American Society Testing Materials
AWS	American Welding Society
D	Coeficiente de destacamento da gota
Dg	Destacamento da gota
DBCP	Distância Bico de Contato Peça
F	Frequência de pulsação
FCAW	Fluxed Cored Arc Welding
FFT	Transformada Rápida de Fourier
GMAW	Gas Metal Arc Welding
Hz	Hertz (unidade de medição de frequência)
I _b	Corrente de base [A]
I _m	Corrente média [A]
I _p	Corrente de pico [A]
ISO	International Standard Organization
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
RMS	Root Mean Square
T	tempo de soldagem [s]
t _b	tempo de base [ms]
t _p	tempo de pico [ms]
V	Volt (unidade de medição de tensão corrente elétrica)
V _a	Velocidade do arame
V _s	velocidade de soldagem (mm/min.)

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Representação esquemática da soldagem utilizando arame tubular com proteção gasosa.....	20
Figura 2: Representação esquemática da soldagem utilizando arame tubular autoprotetido.	22
Figura 3: Nomenclatura dos elementos para o arco elétrico no processo MIG/MAG e o arame tubular.	24
Figura 4: Ângulo de inclinação da tocha (esquemático).....	27
Figura 5: Inclinação e sentido da tocha.....	27
Figura 6: Principais modos de transferência metálica.	28
Figura 7: Relação entre tensão e corrente para os diferentes modos de transferências metálica.	28
Figura 8: Oscilograma da corrente pulsada.	31
Figura 9: Comparação da análise de um sinal através dos domínios de tempo e frequência.....	35
Figura 10: Montagem esquemática da medição da corrente e tensão.....	51
Figura 11: Distribuição e localização dos equipamentos utilizados.....	51
Figura 12: Bancada de fixação do corpo de prova	52
Figura 13: Etapas da obtenção e tratamento dos sinais.	52
Figura 14: Sinais de corrente, tensão e aceleração para 170 A / 22,22 Hz / 350 mm/min / 30 mm para 10 segundos.....	56
Figura 15: Sinais de corrente, tensão e aceleração para 200 A / 20,00 Hz / 300 mm/min / 33 mm para 10 segundos.....	56
Figura 16: Sinais de corrente, tensão e aceleração para 230 A / 18,18 Hz / 400 mm/min / 33 mm para 10 segundos.....	57
Figura 17: Histograma das correntes.	60
Figura 18: Curva de distribuição das correntes.	60
Figura 19: Corrente RMS e tensão RMS.....	63
Figura 20: Corrente RMS e Aceleração RMS.....	66
Figura 21: Histograma das acelerações.....	66
Figura 22: Curva de distribuição das acelerações.....	67
Figura 23: Sinais da corrente, tensão e aceleração para 170 A / 22,22 Hz / 350 mm/min / 30 mm para 0,5 segundos.....	68

Figura 24: Sinais da corrente, tensão e aceleração para 200 A / 20,00 Hz / 300 mm/min / 33 mm para 0,5 segundos.....	68
Figura 25: Sinais da corrente, tensão e aceleração para 230 A / 18,18 Hz / 400 mm/min / 33 mm para 0,5 segundos.....	69
Figura 26: Sinais sobrepostos da (corrente e tensão) e (corrente e aceleração) para 170 A / 22,22 Hz / 350 mm/min / 30 mm para 0,5 segundos.....	70
Figura 27: Sinais sobrepostos da (corrente e tensão) e (corrente e aceleração) para 200 A / 20,00 Hz / 300 mm/min / 33 mm para 0,5 segundos.....	70
Figura 28: Sinais sobrepostos da (corrente e tensão) e (corrente e aceleração) para 230 A / 18,18 Hz / 400 mm/min / 33 mm para 0,5 segundos.....	71
Figura 29: Espectros de frequência para 170 A / 22,22 Hz / 350 mm/min / 30 mm. .	74
Figura 30: Espectros de frequência para 200 A / 20,00 Hz / 300 mm/min / 33 mm. .	74
Figura 31: Espectros de frequência para 230 A / 18,18 Hz / 400 mm/min / 33 mm. .	75
Figura 32: Quantidade de picos para 170 A / 22,22 Hz / 350 mm/min / 30 mm.	77
Figura 33: Quantidade de picos para 200 A / 20,00 Hz / 300 mm/min / 33 mm.	78
Figura 34: Quantidade de picos para 230 A / 18,18 Hz / 400 mm/min / 33 mm.	78
Figura 35: Efeitos das variáveis sobre a Aceleração RMS.....	85
Figura 36: Efeitos das variáveis sobre a Frequência de Pulsação Obtida da Corrente.	86
Figura 37: Efeitos das variáveis sobre a Quantidade de Picos	87
Figura 38: Efeitos das variáveis sobre a Potência.....	88
Figura 39: Efeitos das variáveis sobre a Amplitude.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química das barras de aço SAE 1020.	41
Tabela 2 - Composição química do metal de adição – EC 410 NiMo MC.....	42
Tabela 3 - Parâmetros e níveis mantidos constantes durante a soldagem.	46
Tabela 4 - Parâmetros e níveis utilizados para os ensaios preliminares.	47
Tabela 5 - Velocidade do arame calculada para os ensaios realizados.	48
Tabela 6 - Variáveis de influência da soldagem e seus níveis.	49
Tabela 7 - Valores dos ensaios com corrente convencional.	50
Tabela 8 - Instrumentos virtuais (VI) utilizados nos ensaios	53
Tabela 9 - Sinais obtidos nos ensaios realizados.....	53
Tabela 10 - Intervalo de tempo analisado em cada ensaio.	54
Tabela 11 - Valores das correntes máximas, mínimas, médias e RMS.	58
Tabela 12 - Valores médios e desvio padrão das correntes.	59
Tabela 13 - Valores das tensões máximas, mínimas, médias e RMS.....	61
Tabela 14 - Valores médios e desvio padrão das tensões.....	62
Tabela 15 - Valores das amplitudes, positivas, negativas, amplitude total e aceleração RMS.	64
Tabela 16 - Valores médios e desvio padrão das amplitudes e acelerações.	65
Tabela 17 - Valores das frequências de pulsação obtidas para corrente, tensão e aceleração.....	73
Tabela 18 - Quantidade de picos na corrente, tensão e aceleração.	76
Tabela 19 - Variáveis de respostas.	80
Tabela 20 - Análise de Variância (ANOVA) para Aceleração.....	81
Tabela 21 - Análise de Variância (ANOVA) para Frequência de Pulsação Obtida....	81
Tabela 22 - Análise de Variância (ANOVA) para Quantidade de Picos.	82
Tabela 23 - Análise de Variância (ANOVA) para Potência Eficaz.	82
Tabela 24 - Análise de Variância (ANOVA) para Amplitude da Aceleração.	82
Tabela 25 - Análise de Variância (ANOVA) obtida através da Análise de Regressão para as variáveis de resposta (p-valor).	83
Tabela 26 - Matriz de correlação entre as variáveis de resposta.	84
Tabela 27 - Correlação de Pearson pareadas.....	84

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO	15
1.2	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	PROCESSO DE SOLDAGEM	18
2.2	CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR	19
2.3	VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO PROCESSO COM ARAME TUBULAR	22
2.4	VARIÁVEIS DO PROCESSO COM ARAME TUBULAR	24
2.5	TRANSFERÊNCIA METÁLICA	28
2.6	PULSAÇÃO DO ARCO ELÉTRICO	30
2.7	ESTABILIDADE DO ARCO ELÉTRICO	33
2.8	FUNDAMENTOS DE VIBRAÇÃO	34
2.9	TRANSFORMADAS DE FOURIER E SUAS APLICAÇÕES NA SOLDAGEM	36
2.10	ANÁLISE DE VARIÂNCIA UNIVARIADA (ANOVA)	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	41
3.2	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	42
3.3	ENSAIOS PRELIMINARES	46
3.4	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	48
3.5	CORPO DE PROVAS E SENSORES	50
3.6	OBTENÇÃO DOS SINAIS	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1	OBTENÇÃO E ANÁLISE DOS SINAIS	55
4.2	ANÁLISE DE FOURIER	72
4.3	ANÁLISE NA QUANTIDADE DE PICOS	75
4.4	INFLUÊNCIAS DA VARIÁVEIS	79
5	CONCLUSÕES	89
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	90
	REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais a indústria moderna tem buscado a potencialização da produção com o menor custo de fabricação possível, que juntamente com a eficiência energética compõe os principais desafios técnicos industriais.

A soldagem é um processo de união de materiais (principalmente metais) mais importante no ponto de vista industrial, sendo amplamente utilizada na fabricação e recuperação de estruturas metálicas, equipamentos e redes de tubulação. Abordando desde pequenos componentes eletrônicos até grandes estruturas e equipamentos.

Conseqüentemente, a soldagem foi atingindo escalas industriais, e as exigências e padrões de qualidade da solda no mercado também foram aumentando. A fim de garantir a qualidade do processo, é necessário tomar certos cuidados, desde os mais simples, como inspeções visuais, os intermediários, como ensaios não-destrutivos (radiologia, ultrassom, partículas magnéticas, líquido penetrante) e também os mais rigorosos realizados pelos ensaios destrutivos (tração, dureza, metalografia).

As inspeções e ensaios são efetuadas após o processo de soldagem, e conforme a aplicação do produto, são feitos em todas as peças ao longo de toda a superfície soldada. Isso aumenta o custo final de produção, devido à necessidade de pessoas capacitadas, equipamento, insumos e horas de trabalho.

Os processos de soldagem são classificados em dois grupos, sendo eles a soldagem por pressão e a soldagem por fusão. O mais utilizado é a de soldagem por fusão, em especial os processos de fusão a arco. Deste modo, pode-se destacar o arco elétrico como um dos principais elementos do processo de soldagem, visto que ele é o responsável pelo calor da fusão necessária para a união. Por essa razão, a compreensão dos fenômenos físicos que envolvem o arco de soldagem é fundamental para o estudo e para a aplicação do processo (MODENESI, 2001, p.03).

Entre os processos que se destacam no segmento da soldagem, com utilização crescente, temos o processo de soldagem com arame tubular (*Flux Cored Arc Welding* - FCAW). Este processo é evidenciado no meio industrial por apresentar grande capacidade produtiva, assegurada principalmente pela alta densidade de corrente, o que garante alta taxa de fusão, alto fator de trabalho e automatização do processo. Porém, as correlações entre suas variáveis atuam de forma complexa, onde

necessitam certo grau de domínio e habilidade do operador, supervisor e engenheiro de soldagem, para garantir o melhor aproveitamento de suas qualidades operacionais (SOUZA; FERRARESI, 2013, p.01).

Além disso, com o avanço de novas tecnologias, principalmente eletrônica para a fabricação de fontes de soldagem a arco voltaico, há a possibilidade da utilização de corrente pulsada nos processos de soldagem. Estudos recentes mostram que a corrente pulsada proporciona a obtenção de uma maior taxa de deposição quando comparada à corrente convencional, além de um maior controle dos parâmetros durante a soldagem. Estes estudos revelam as melhores condições de soldagem quando utilizadas correntes pulsadas, sendo alguns desses autores: (SILVA, 2006, p.21; SARNI, 2011, p.23; MELO, 2018, p.27).

Durante a soldagem o arco elétrico gera fenômenos físicos como a emissão do calor, emissão de campos eletromagnéticos, emissão de luminosidade, emissão de pressão acústica e emissão de vibrações. Alguns desses fenômenos são percebidos pelos operadores experientes para monitorar e controlar a execução de soldas (CAYO, 2008, p.01).

O processo de soldagem a arco com eletrodo tubular FCAW (*Flux Cored Arc Weld*) tem se mostrado, atualmente, como aquele de maior crescimento no ambiente industrial, decorrente de sua alta produtividade e excelente qualidade dos cordões de solda, em relação ao eletrodo revestido. Em virtude disto, a soldagem com arame tubular vem progressivamente substituindo o processo de soldagem com eletrodo revestido. Em breve estará assumindo uma posição preferencial, em relação aos demais processos de soldagem (MACHADO, 1996, p.158).

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo do presente trabalho é mostrar a possibilidade do monitoramento do processo de soldagem por arame tubular em corrente pulsada no revestimento, utilizando um sensor não intrusivo (acelerômetro) simultaneamente com os sinais de corrente e tensão. Essa análise será realizada por meio dos seguintes objetivos específicos:

- ✓ Determinar a influência dos parâmetros de soldagem (corrente média, frequência de pulsação, velocidade de soldagem e DBCP) sobre as variáveis de respostas do sistema (aceleração, frequência de pulsação obtida, quantidade de picos, potência e amplitude da aceleração);
- ✓ Analisar as respostas dos sinais elétricos da corrente, tensão e aceleração para interpretação dos resultados;
- ✓ Utilizar a análise de Fourier para determinar a frequência de oscilação dos três sinais adquiridos;
- ✓ Verificar a quantidade picos em determinado período para averiguar se o mesmo está de acordo com o valor da frequência encontrada utilizando a série de Fourier;
- ✓ Contribuir com os estudos referentes à interpretação dos sinais elétricos no processo de soldagem por arame tubular.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos, distribuídos da seguinte forma.

O capítulo 1 descreve a introdução e uma abordagem geral das tecnologias relacionadas à pesquisa do presente trabalho, os objetivos a serem alcançados e a organização do mesmo.

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento da pesquisa. Foi realizada uma abordagem nas áreas de processos de soldagem por arame tubular, arco elétrico e transferência metálica, obtidas em dissertações, teses, artigos e livros pertinentes ao assunto.

O capítulo 3 apresenta a metodologia e os materiais que foram utilizados para realizar os ensaios. Trazendo uma abordagem à plataforma de desenvolvimento que consiste no hardware, instrumentação para a aquisição de sinais de tensão de arco, corrente de soldagem e deslocamento, assim como as características dos materiais que foram utilizados e todo o procedimento experimental.

No capítulo 4 apresenta-se os resultados obtidos dos experimentos realizados com a realização de comentários pertinentes, e no capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais do trabalho e as recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como finalidade apresentar informações teóricas necessárias para a compreensão e desenvolvimento da pesquisa. Os tópicos abordados no trabalho serão escritos com base em autores que analisaram em suas pesquisas o mesmo assunto abordado neste estudo e pesquisadores já conhecidos na área da soldagem pelas suas contribuições.

A seguir teremos um breve histórico do processo de soldagem arame tubular (FCAW), abordando algumas das suas características, as variáveis envolvidas, suas vantagens e limitações. Além disso, iremos abordar um pouco da teoria sobre pulsação e instabilidade do arco elétrico, fundamentos de vibração e transformadas de Fourier para determinar a frequência de oscilação de todo o sistema.

A revisão da literatura é uma parte essencial no processo de investigação, pois além de definir bem o problema, oferece uma ideia precisa a respeito do estado atual dos conhecimentos sobre o tema, suas lacunas e contribuições para o desenvolvimento da pesquisa (BENTO, 2012, p.01).

2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM

De acordo com a evolução histórica do processo de soldagem, podemos dizer que essa prática é utilizada há muitos anos, afinal nossos antepassados já usavam a técnica de união de materiais por brasagem. Um dos objetivos principais em usufruir do processo de soldagem naquela época era a fabricação de armas e instrumentos cortantes. O processo de soldagem só passou a ter uma maior aplicação e progresso a partir da descoberta do gás acetileno (C_2H_2) e da produção de arco elétrico (MODENESI; MARQUES, 2012, p.03).

Inicialmente, a soldagem era definida como “a junção de metais por fusão”, porém com o avanço da tecnologia, constatou-se que não é necessário que haja de fato o processo de fusão para que ocorra a união, ou que seja apenas entre metais. Portanto, segundo a tradução da definição dada pela *American Welding Society* (AWS), temos: “soldagem é o processo de junção de materiais que produz a

coalescência dos materiais mediante aquecimento deles a temperatura apropriada com ou sem aplicação de pressão, ou com aplicação apenas de pressão, e com ou sem o uso de material de enchimento” (MODENESI; MARQUES, 2012, p.03).

A soldagem visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando, na junta soldada, a continuidade de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas (ALVES, 2016, p.05).

A soldagem se tornou um dos processos mais importantes dentro de um setor industrial, podendo ser utilizada na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas. O seu campo de aplicação é grande, podendo atender desde componentes eletrônicos pequenos até grandes estruturas e equipamentos (MONTEIRO, 2011, p.46).

Nos dias atuais existem diferentes processos de soldagem, tais como a soldagem por arco submerso, por eletrodo revestido, MIG/MAG, plasma, por arame tubular, dentre outras. Cada processo de soldagem possui suas características próprias e objetivos para cada aplicação, a definição do processo de soldagem a ser utilizado depende de um conjunto de fatores a serem considerados, como o metal de adição, o processo de soldagem adequado em sintonia com o equipamento a ser utilizado, a localização e tamanho da peça, e ainda o soldador adequado, entre outros (GUIMARÃES, 2020, p.15).

2.2 CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR

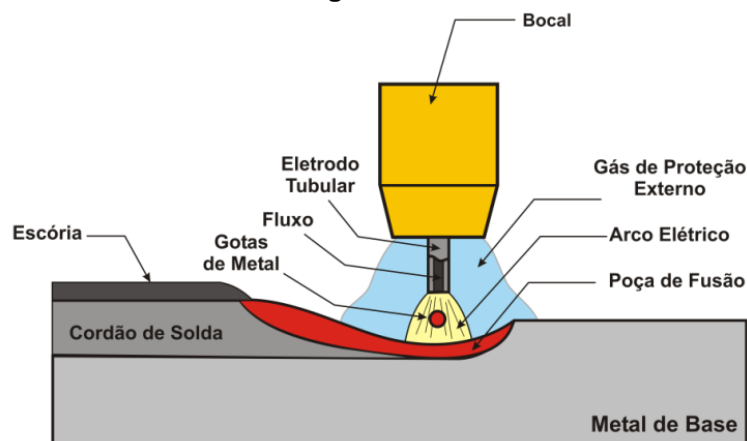
O processo de soldagem com arame tubular (FCAW – “*Flux Cored Arc Welding*”) é um processo de soldagem por fusão, onde o calor necessário para se realizar a soldagem é fornecido por um arco elétrico que se estabelece entre a ponta de um eletrodo continuamente alimentado e o metal base a ser soldado. O fato deste processo possuir um eletrodo com formato tubular que contém em seu interior um fluxo, lhe permite conciliar o alto fator de trabalho e a alta taxa de deposição característica do processo MIG/MAG com a alta versatilidade da soldagem com eletrodos revestidos no ajuste de composição química e facilidade de trabalho em campo (AWS, 2004, p.189; MARQUES *et al.*, 2009, p.249).

Existem dois métodos básicos para soldar com arame tubular. No modo denominado autoprotegido, somente a escória e os gases produzidos pela decomposição de alguns dos seus elementos protegem o metal de solda da contaminação da atmosfera (principalmente de gases O_2 e N_2). A outra variação de arame tubular é o método que utiliza um gás de proteção adicional externamente, geralmente CO_2 puro, ou misturas desse gás com argônio e, algumas vezes, também com oxigênio (MACHADO, 1996, p.158).

➤ Arames com proteção gasosa

Os arames com proteção gasosa utilizam equipamentos semelhantes aos utilizados no processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*). O bocal e a tocha são adaptados para a passagem do gás de proteção e são conectados ao cilindro. A Figura 1 representa o desenho do processo da soldagem com proteção gasosa, mostrando o bocal adaptado e os elementos presentes durante o processo. Na maioria das vezes a intensidade de corrente acaba sendo maior e a tocha pode ser resfriada a água ou com o próprio gás de proteção.

Figura 1: Representação esquemática da soldagem utilizando arame tubular com proteção gasosa.



Fonte: Pessoa, 2015, p.66.

Este tipo de arame não é recomendado para uso em trabalho em campo, já que a presença do vento pode acarretar na perturbação da camada de gás e causar perda de proteção. O processo de proteção a gás é apropriado para produção de peças pequenas e soldagem de elevada penetração (MARQUES *et al.*, 2009, p.249).

Machado (1996, p.159) comenta que em relação ao arame tubular autoprotetido, esta variação de arame tubular com proteção gasosa apresenta em geral soldas com menos descontinuidades, já que a proteção contra a contaminação atmosférica é mais eficiente.

➤ Arames autoprotetido

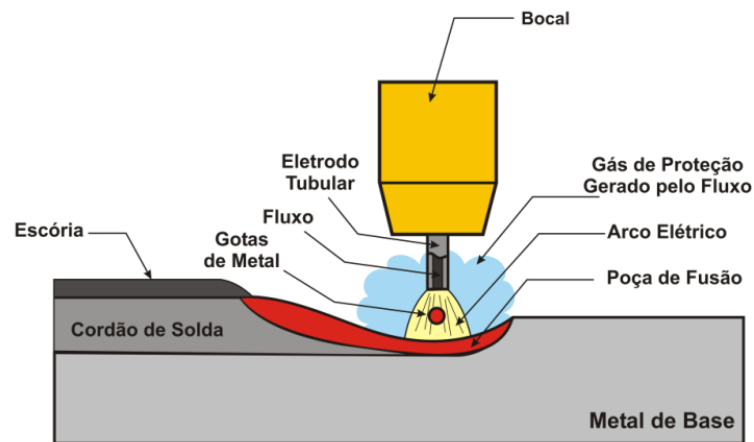
Os arames tubulares autoprotetido possuem em seu interior um fluxo composto por elementos capazes de gerar os gases necessários para proteção da poça de fusão e do arco elétrico, não necessitando desta maneira de uma fonte externa de proteção gasosa.

A soldagem com arame autoprotetido é interessante porque possui menor sensibilidade a correntes de ar, sendo um processo adequado à soldagem em campo. Em locais de difícil acesso, onde a utilização de gás de proteção não se apresenta viável, usa-se esse tipo de arame (CASTRO, 2015, p.23). A possibilidade de soldagem em todas as posições é uma vantagem adicional deste método (MACHADO, 1996, p.159). Além disso, esta variação representa menores custos de soldagem em comparação ao método com proteção gasosa, devido à maior simplicidade dos equipamentos, já que não requer cilindros de gás, e, conseqüentemente, o bocal e a tocha não necessitam de compartimento para passagem de gás (CASTRO, 2015, p.24).

As desvantagens consistem na variação de arame, que geralmente produz maior quantidade de fumos nocivos, o que requer o uso de máscaras respiratórias ou ventilação adequada. Adicionalmente, há algumas condições que podem produzir soldas com propriedades mecânicas inferiores, já que nem sempre a proteção contra contaminação atmosférica é eficaz (MACHADO, 1996, p.164).

A Figura 2 apresenta uma representação da soldagem com arame autoprotetido. Segundo ESAB (2012, p.01), no processo de soldagem contínuo os arames tubulares autoprotetidos são capazes de atingir maiores taxas de deposição que os eletrodos revestidos, sendo desenvolvidos para aplicações de soldagem em geral e aplicações específicas como reparos, soldagem fora de posição e soldagem de alta deposição. Marques *et al.* (2009, p.250) comenta que alguns arames tubulares autoprotetidos são especificamente desenvolvidos para a soldagem de chapas finas a altas velocidades de soldagem.

Figura 2: Representação esquemática da soldagem utilizando arame tubular autoprottegido.



Fonte: Pessoa, 2015, p.66.

De acordo com ESAB (2012, p.01) um processo de soldagem contínuo, os arames tubulares autoprottegidos são capazes de atingir maiores taxas de deposição que os eletrodos revestidos e são desenvolvidos para aplicações de soldagem em geral e aplicações específicas como reparos, soldagem fora de posição e soldagem de alta deposição. Marques *et al.* (2009, p.250) comenta que alguns arames tubulares autoprottegidos são especificamente desenvolvidos para a soldagem de chapas finas a altas velocidades de soldagem.

2.3 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO PROCESSO COM ARAME TUBULAR

Como todo processo de soldagem o arame tubular tem suas vantagens e limitações e algumas delas são descritas a seguir.

➤ Vantagens

A notoriedade do processo com arame tubular, segundo Souza e Ferraresi (2013, p.02), tem crescido devido às possíveis vantagens que este processo oferece em relação aos outros processos, tais como:

- ✓ Benefícios metalúrgicos provenientes do fluxo interno do arame;
- ✓ Auxílio da escória na forma e aspecto do cordão de solda;

- ✓ Alta qualidade do metal depositado (especialmente eletrodos básicos e com núcleo de pó metálico);
- ✓ Ótima aparência da solda (solda uniforme);
- ✓ Fácil operação devido à alta facilidade de mecanização;
- ✓ Alta taxa de deposição devido à alta densidade de corrente no eletrodo tubular em relação ao arame maciço;
- ✓ Relativamente alta eficiência de deposição (exceto para o eletrodo autoprotégido);
- ✓ Arco visível quando comparado com o processo a arco submerso;
- ✓ Requer uma menor limpeza e preparação da junta do que no MIG/MAG;
- ✓ Distorção reduzida da peça em relação ao eletrodo revestido;
- ✓ Eletrodos autoprotégidos não necessitam de equipamentos para armazenamento e alimentação de gás de proteção adicional.

➤ Limitações

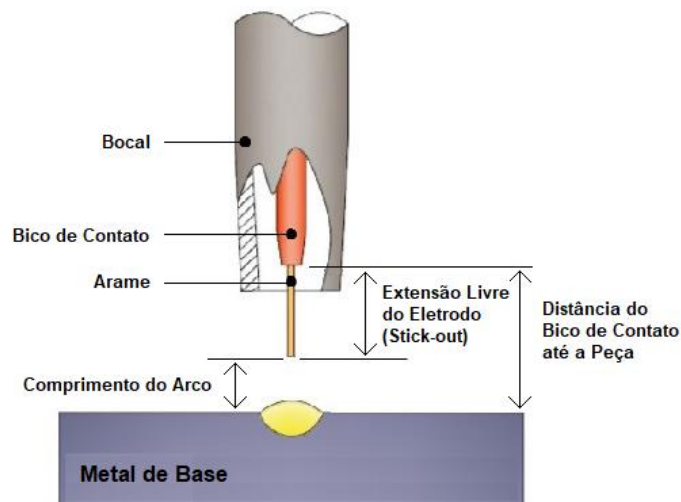
Atualmente, a demanda por aumento de produtividade e redução de custos tem sido o principal motivo para a escolha do arame tubular. A continuidade do processo devido à ausência de troca do eletrodo e a automação também foram fatores importantes para que houvesse maior uso deste processo. Por outro lado, Bracarense (2010, p.05) cita as seguintes limitações da soldagem com arame tubular:

- ✓ Limita-se à soldagem de metais ferrosos e liga à base de níquel;
- ✓ Necessidade de remoção de escória para arame com fluxo não metálico;
- ✓ O arame tubular é mais caro que o arame de eletrodo maciço, entretanto, à medida que aumentam os elementos de ligas esta relação diminui;
- ✓ O equipamento é mais caro se comparado ao utilizado para soldagem pelo processo GTAW e SMAW;
- ✓ Restrição da soldagem ao ar livre (somente para soldagem FCAW com gás de proteção);
- ✓ O alimentador de arame e a fonte de energia devem estar próximos ao local de trabalho;
- ✓ São gerados mais fumos do que os processos GMAW e SAW.

2.4 VARIÁVEIS DO PROCESSO COM ARAME TUBULAR

A quantidade de variáveis a serem ajustadas no processo com arame tubular é grande, e todas, em maior ou menor grau, impactam nas características do cordão de solda. Como, por exemplo: a corrente, a tensão, a velocidade de soldagem, a velocidade de alimentação do arame, a distância bico, a inclinação da tocha, proteção gasosa, tipo de transferência metálica e a estabilidade do arco elétrico. Cada uma dessas variáveis pode ser controlada separadamente, apesar do efeito de uma estar diretamente relacionado com a atuação da outra. Portanto, é necessário selecionar adequadamente os parâmetros que serão utilizados em cada tarefa. A Figura 3 ilustra a nomenclatura dos elementos para o arco elétrico no processo MIG/MAG e o arame tubular.

Figura 3: Nomenclatura dos elementos para o arco elétrico no processo MIG/MAG e o arame tubular.



Fonte: Adaptada de (CAYO, 2008, p.06).

➤ Corrente de soldagem

A corrente de soldagem tem grande influência no processo por arame tubular, e caso todas as outras variáveis do processo sejam mantidas constantes, um aumento na corrente proporciona um aumento na taxa de deposição, na penetração e na largura do cordão de solda (PESSOA, 2015, p.69). Já o uso de elevadas correntes tornam o cordão de solda convexo e com aparência deteriorada, enquanto que baixas intensidades de corrente têm como consequência uma transferência globular com

gotas grandes e excessivos respingos. Quando se utiliza uma fonte de tensão constante, a corrente de soldagem é diretamente proporcional à velocidade de alimentação do arame (AWS, 2004, p.78).

➤ Tensão de Soldagem

Nas mesmas condições citadas acima, um aumento na tensão proporcionará alargamento e achatamento do cordão de solda, aumento da largura de fusão e aumento do aporte térmico, que resultará em um aumento do tamanho da zona termicamente afetada. Uma tensão de soldagem muito alta poderá causar porosidades, respingos e mordeduras. Já uma tensão muito baixa tenderia a estreitar o cordão de solda e aumentar a altura do reforço do cordão (CAYO, 2008, p.08).

➤ Extensão livre do eletrodo (*stick out*)

A extensão do eletrodo (*stick-out*) é a distância entre o último ponto de contato elétrico, normalmente a extremidade do bico de contato, e a peça de trabalho. Quando esta distância aumenta, aumenta também a resistência elétrica do eletrodo, que terá assim mais tempo para se aquecer por efeito Joule.

Com esta elevação da temperatura do eletrodo, será necessária uma menor corrente para fundir o eletrodo para a mesma taxa de alimentação, ou vindo de outra forma, para a mesma corrente de soldagem utilizada, se obterá uma maior taxa de deposição, porém com menor penetração. As extensões normalmente utilizadas situam-se na faixa entre 6 e 13 mm para a transferência por curto-circuito e entre 13 e 35 mm para os demais modos de transferência (CAYO, 2008, p.08).

➤ Distância do bico de contato até a peça - DBCP

A DBCP vai influenciar o calor desenvolvido pelo efeito Joule, quanto maior este parâmetro maior o efeito Joule ($Q = I^2.R.t$), influenciando a fusão do consumível e o aquecimento do fluxo interno do arame. Se esta distância for excessiva irá ocasionar muitos respingos e cordões convexos, se esta distância for muito pequena, poderá ocorrer instabilidade do arco elétrico. Segundo Machado (1996, p.166), para arames tubulares autoprotetidos a DBCP pode variar entre 20 e 90 mm, e para arames tubulares com proteção gasosa, a distância pode se situar entre 20 e 40 mm.

➤ Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem é a relação entre o caminho percorrido pelo arco ao longo da peça e o tempo gasto para percorrê-lo, exercendo influência direta na taxa de deposição e na geometria do cordão (TEIXEIRA, 2011, p.11).

Uma velocidade de soldagem muito baixa irá resultar em cordões largos e com muito depósito de material. Em velocidade muito alta irá resultar em cordões estreitos e com pouca penetração. Portanto, a penetração tende a aumentar com o uso de velocidades intermediárias e depois diminuir com velocidades mais (MIRANDA, 2002, p.32). Velocidades utilizadas acima do limite estabelecido produzem trincas por solidificação (TEIXEIRA, 2011, p.11).

➤ Inclinação da Tocha de Soldagem

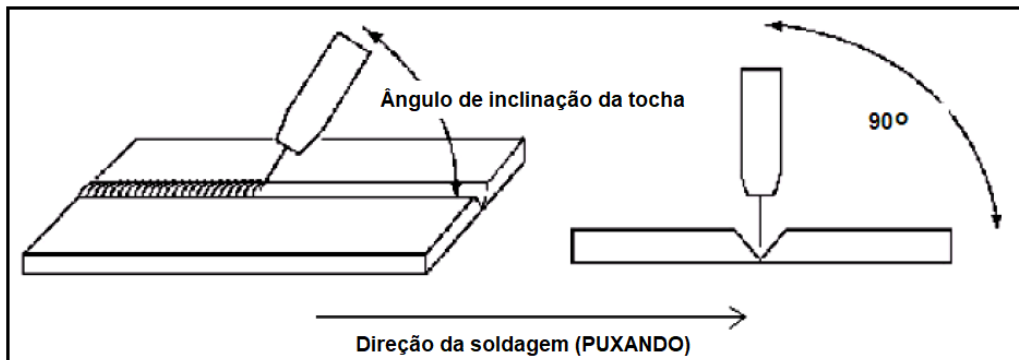
O ângulo de inclinação ou de deslocamento da tocha de soldagem (φ), na qual se monta o arame tubular, exerce grande influência no controle da escória e no perfil do depósito do cordão de solda. O ângulo de inclinação determina a direção na qual a força do arco é aplicada na poça de fusão.

Este deslocamento da força do arco é usado para ajudar a construir a forma desejada do cordão de solda e evitar a formação de escória na frente da poça de fusão, reduzindo assim o risco de causar inclusões de escória.

Para garantir o correto posicionamento da tocha de soldagem, é necessário definir o plano de deslocamento e a inclinação da tocha de soldagem (arame tubular). O plano de deslocamento é formado perpendicularmente ao plano da superfície a ser soldada do material de base e passa pelo eixo do cordão de solda.

O ângulo de inclinação da tocha de soldagem é formado neste plano, entre o eixo do arame de solda e a linha do cordão de soldagem. Se sua inclinação for compatível com o sentido de deslocamento da solda, ou seja, o arame de solda apontar para o cordão de solda já formado, é considerado positivo (técnica puxando) conforme a Figura 4. E caso seja discordante deste sentido é considerado negativo (técnica empurrando).

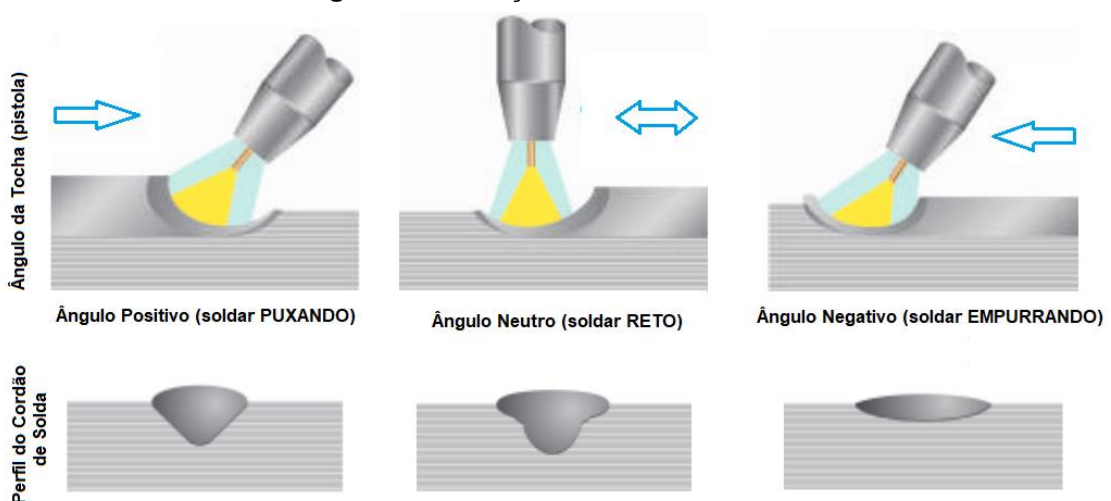
Figura 4: Ângulo de inclinação da tocha (esquemático).



Fonte: Adaptada de (RODRIGUES, 2005, p.26).

Com a utilização do gás de proteção em juntas de topo (*butt joint*), é usual o emprego de um ângulo de inclinação entre 60° e 70° , na técnica “puxando” que direciona a tocha com maior proximidade à poça de fusão, na qual se obtém maior penetração, menor quantidade de respingos, cordão mais estreito, além de auxiliar na formação de um reforço convexo e um arco mais estável (RODRIGUES, 2005, p.25). A técnica “empurrando” direciona a tocha mais para a direção do metal base (mais frio), na qual possui as características de menor penetração, mais respingos, cordões mais achatados e largos, com difícil visibilidade do processo. Quando uma grande penetração é necessária, a técnica de “puxar” é amplamente utilizada. As características intermediárias são obtidas ao usar um ângulo neutro (soldar reto). Na Figura 5 é possível visualizar os três tipos de ângulos de soldagem.

Figura 5: Inclinação e sentido da tocha.



Fonte: Adaptado de (GERDAU, 2010, p.12).

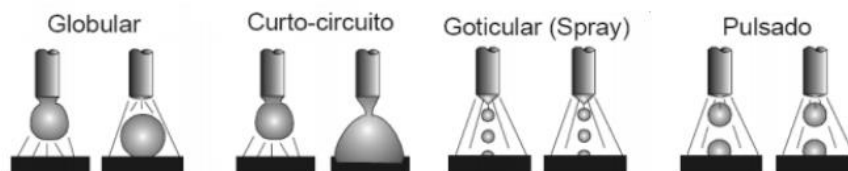
2.5 TRANSFERÊNCIA METÁLICA

A transferência metálica é o modo como o metal fundido se transporta da ponta do eletrodo para a poça de fusão, e este modo determina: a estabilidade do processo, a possibilidade de soldagem em várias posições, a quantidade de respingos gerada, a qualidade e a geometria da solda e a aparência superficial do cordão de solda (NIXON; NORRISH, 1988, p.05; NORRISH, 1992, p.231).

Devido à grande influência na soldagem, o estudo dos fenômenos de transferência metálica começou quase que no mesmo período da implementação dos processos que empregam eletrodos consumíveis (MIRANDA, 2002, p.35). Com isto, foram identificados os quatro principais tipos de transferência metálica: curto-circuito, globular, pulsado e globular “spray”, ilustrados na Figura 6.

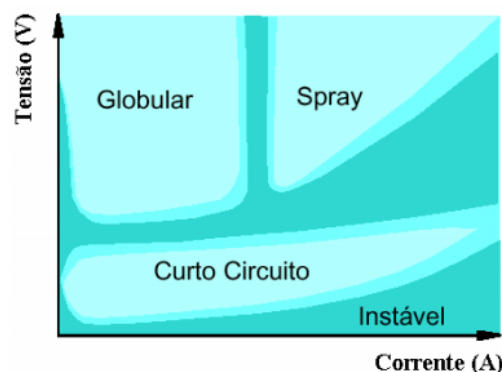
O tipo de transferência é determinado por alguns fatores como a magnitude e o tipo de corrente, o diâmetro do arame eletrodo, a composição do arame e o gás de proteção (MIRANDA, 2002, p.36). A Figura 7 ilustra a relação entre o modo de transferência, a tensão e a corrente de soldagem no processo.

Figura 6: Principais modos de transferência metálica.



Fonte: Adaptado de (BARRA, 2003, p.20).

Figura 7: Relação entre tensão e corrente para os diferentes modos de transferências metálica.



Fonte: Adaptado de (MODENESI, 2001, p.26).

A transferência por curto-circuito é caracterizada por uma extinção e reignição cíclica do arco, o que resulta em grandes flutuações de tensão e corrente. O metal é transferido em baixas correntes e tensões, geralmente entre 30 e 200 A e 15 a 22 V, respectivamente, sendo por isso também denominado “arco curto” (*short arc*), utilizando arame-eletrodos de pequena bitola (TEIXEIRA, 2018, p.24). Como não existe arco no momento em que ocorre o curto-circuito, o metal fundido é transferido devido à tensão superficial. Este modo de transferência produz uma poça de fusão relativamente pequena, de rápida solidificação, sendo indicado para a soldagem de seções finas em todas as posições (LANCASTER, 1986, p.259; TEIXEIRA, 2018, p.24).

O modo de transferência globular caracteriza-se pela formação de uma gota de metal fundido na ponta do eletrodo consumível com diâmetro superior a este. Quando a gota atinge tamanho suficiente para romper a tensão superficial, por meio das forças da gravidade e eletromagnéticas que causam o (efeito *pinch*), ela se destaca do eletrodo consumível e se transfere através do arco em direção à poça de fusão. Novamente, a transferência de grandes gotas de metal resulta em grandes flutuações de tensão e corrente, que são facilmente detectadas e diferentes do modo de transferência em curto-circuito (TEIXEIRA, 2018, p.24).

Na transferência por *spray*, com aumento da corrente de soldagem, o diâmetro das gotas de metal que se transferem para a peça diminui, até certa faixa de corrente onde o modo de transferência muda bruscamente de globular para *spray*. Esta corrente na qual ocorre esta mudança no modo de transferência é chamada corrente de transição. As gotas desta vez são pequenas e são destacadas da ponta do arame devido a certas forças magnéticas que atuam nas direções radiais e axiais. O cordão tem um bom acabamento e praticamente não há respingos (BARBEDO, 2011, p.14).

A transferência por corrente pulsada é o modo de transferência controlada que se dá através do controle da forma de onda da corrente de soldagem, utilizando a corrente pulsada. O pulsado, une as vantagens da transferência por *spray*, mas em níveis menores de corrente média, permitindo sua utilização em chapas finas e a soldagem em todas as posições. No pulsado existem dois níveis de corrente, uma acima da corrente de transição (corrente de pico) que atua em um intervalo de tempo (tempo de pico) e outra abaixo da corrente de transição (corrente de base) que atua em outro intervalo de tempo (tempo de base). O destacamento da gota formada na

ponta do arame ocorre quando se sobrepõe a corrente de pico. O diâmetro da gota é aproximadamente o mesmo do eletrodo (BARBEDO, 2011, p.14).

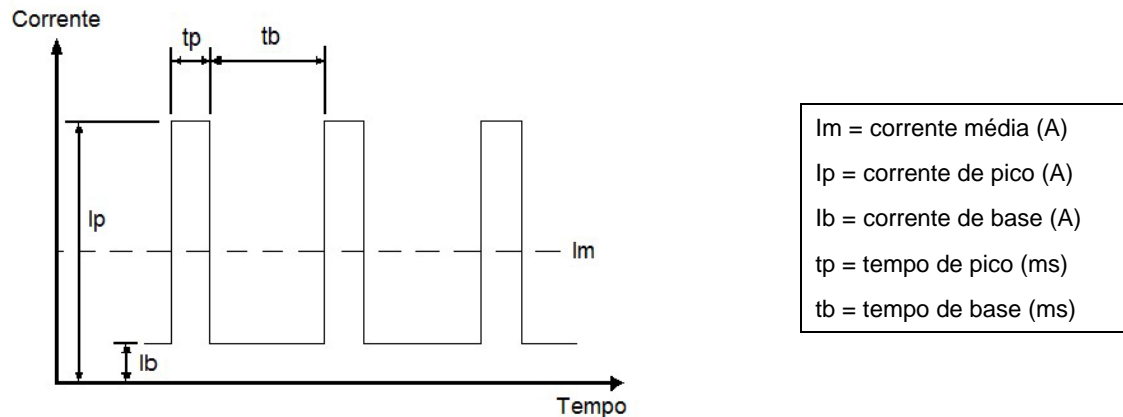
2.6 PULSAÇÃO DO ARCO ELÉTRICO

A transferência de metal durante o processo de soldagem quando se utiliza o arco elétrico pulsado permite ótimas taxas de deposição em todas as posições. A corrente é a característica que se modifica ao longo do processo. A corrente de pico é a responsável pelo aumento na aceleração momentânea da taxa de fusão do arame. Já a corrente de base, representada pelo nível mais baixo, possui diversas funções, como: manter o arco, gerar uniformidade na limpeza catódica, fundamental na soldagem do alumínio, iniciar a fusão do arame e propiciar a formação e o crescimento da gota metálica a ser destacada pela ação da corrente de pico (ANDRADE, 2012, p.31).

Portanto, a função da pulsação é obter, por combinação, o rendimento da fonte de trabalho com dois níveis de corrente. No nível alto de intensidade de corrente, há uma corrente alta aplicada num determinado intervalo de tempo, onde acontece o destacamento da gota; e no nível mais baixo de corrente com um determinado tempo, há a formação da gota, para que esta seja destacada no nível superior de corrente (CORRÊA, 2018, p.30).

Na corrente pulsada, são muitas as variáveis responsáveis pela manutenção da operação de soldagem. Neste sentido, torna-se bastante complexa a tarefa de seleção dos parâmetros de soldagem adequados à necessidade do arco elétrico, as vantagens econômicas, a qualidade da solda e suas propriedades mecânicas. Os parâmetros elétricos envolvidos na soldagem com corrente pulsada são definidos pela corrente de pico (I_p), corrente de base (I_b), tempo de pico (t_p), tempo de base (t_b), além da velocidade de alimentação do arame, velocidade de soldagem e da tensão de soldagem (NORRISH, 1992, p.234). Na Figura 8, pode-se visualizar o formato de uma onda por corrente pulsada, onde se encontram destacados os principais parâmetros de pulso.

Figura 8: Oscilograma da corrente pulsada.



Fonte: AWS, 2004, p.09 apud CORRÊA, 2018, p.31.

Conforme a Figura 8, a corrente pulsada é uma onda periódica e passa de um valor baixo de corrente (corrente de base, I_b) para um valor de maior nível (corrente de pico, I_p), com seus respectivos tempos de duração, tempo de base (t_b) e tempo de pico (t_p). Na corrente pulsada, a intensidade da corrente de pico (I_p) e o tempo de pico (t_p) determinam a fusão do metal de adição no metal de base, e ainda as mesmas variáveis proporcionam o destacamento da gota, sendo que deve acontecer uma gota por pulso, proporcionando uma melhor estabilidade do arco elétrico e uma menor quantidade de respingos. A intensidade da corrente de base (I_b) propicia a manutenção e estabilidade do arco elétrico durante a soldagem e, em conjunto com o tempo de base (t_b) sustenta a gota, dando estabilidade ao ânodo e cátodo, enquanto que no tempo de base (t_b) ocorrerá o resfriamento da poça de fusão, além de ocorrer a formação da gota (NORRISH, 1992, p.236).

Segundo Norrish (1992, p.236), a corrente média pulsada pode ser calculada, de acordo com a Equação 1:

$$I_m = \frac{(I_p \cdot t_p) + (I_b \cdot t_b)}{t_p + t_b} \quad (1)$$

Na corrente pulsada é necessário que apenas uma gota se destaque a cada pulso de corrente, temos como principais parâmetros que controlam o tipo de transferência, o tempo e a corrente de pico, onde esta influência pode ser representada pelo parâmetro de destacamento da gota (D_g) apresentado na Equação 2 (MODENESI, 2001, p.31).

$$Dg = Ip^2 \cdot tp \quad (2)$$

O volume de material fundido é dependente da relação entre a velocidade de alimentação do arame (W) e a frequência da corrente pulsada (Hz), sendo a relação W/Hz proporcional ao volume da gota que se destaca durante um pulso. Quando se mantém constante a velocidade de alimentação do arame e a frequência de onda da corrente, o tamanho da gota transferida em cada pulso se mantém constante (NORRISH, 1992, p.237; MACHADO, 1996, p.166). Quando ocorre uma elevação na corrente de pulso, há um aumento correspondente na taxa de fusão do arame, intensificando o aquecimento do metal de adição (arame) por efeito Joule durante o pulso.

A fonte de soldagem MIG pode ser utilizada na soldagem com arame tubular, e este equipamento de acordo com Cunha *et al.* (2006, p.02) quando ajustado para o controle da tensão, há um ajuste automático da taxa de fusão do arame, conhecida como controle interno. Neste, a corrente de soldagem assume valores de modo a igualar a tensão do arco voltaico à tensão previamente regulada no equipamento. Desta forma, no instante em que a velocidade de avanço do arame cresce, o valor da corrente também aumenta fazendo com que a taxa de fusão do arame aumente, e consequentemente fazendo com que o arco voltaico volte à sua condição inicial.

Segundo Cunha *et al.* (2006, p.03), quando a fonte é ajustada para o controle de corrente, o controle interno é inexistente, sendo necessário conhecer previamente a relação entre a taxa de fusão do arame e a velocidade de alimentação do mesmo. Dentre as várias relações estabelecidas para as variáveis do processo MIG pulsado, está a relação proposta por (DUTRA, 1989, p.02), que relaciona a velocidade de avanço de arame com a corrente média, por meio de uma constante específica para cada arame.

De acordo com Nogueira *et al.* (2015, p.05) a Equação 3 apresenta a relação da constante “ k ” e a corrente média, para determinar a velocidade do arame (V_a).

$$V_a = k \cdot I_m \quad (3)$$

Na corrente pulsada a definição dos parâmetros envolve uma série de variáveis que afetam o destacamento da gota, sua dimensão, a estabilidade do arco, e ainda a velocidade de fusão do arame. É necessário ter um bom conhecimento do efeito de

cada variável envolvida no processo, para a uma correta seleção das variáveis na aplicação desejada, e obter os resultados desejados.

2.7 ESTABILIDADE DO ARCO ELÉTRICO

A estabilidade do arco elétrico é o requisito básico para um bom desempenho na soldagem, afetando diretamente a qualidade final do metal depositado, velocidade de fusão, taxa de deposição, rendimento, geometria de soldagem, e propriedades mecânicas. Um arco estável deve dispor de uma transferência de metal e transferência de carga elétrica simples e uniforme, bem como um comprimento constante e sem respingos.

A fim de facilitar o processo de soldagem e, conseqüentemente, estimar a qualidade da soldagem, diversos estudos têm sido realizados na tentativa de quantificar os fatores que afetam a estabilidade do processo.

Segundo Nogueira *et al.* (2015, p.02), a estabilidade do processo pode ser avaliada por três fatores: estabilidade do arco, regularidade da transferência metálica e comportamento operacional, no qual todos se relacionam de forma bem próxima. De acordo com Machado (1996, p.159) e Suban e Tusek (2003, p.02), na avaliação da estabilidade de processos de soldagem, não existe uma única metodologia, porque o processo é afetado pela maioria das variáveis de soldagem. Antigamente a estabilidade era determinada pela experiência do soldador, principalmente pela falta de recursos tecnológicos para quantificá-la. Hoje em dia, com o auxílio de diferentes equipamentos e programas, a avaliação da estabilidade do processo é feita com base nas variações dinâmicas dos sinais elétricos, sonoros e luminosos emitidos pelo arco elétrico, ou ainda por filmagens de alta velocidade da transferência metálica, sincronizada com os sinais de corrente e tensão (DUTRA *et al.*, 2012, p.03).

A estabilidade do arco na soldagem, segundo alguns autores, depende do comportamento da transferência metálica e da variação da configuração do arco elétrico, sendo o processo de soldagem considerável controlado quando se obtém uma transferência estável e sem respingos (ANDRADE, 2012, p.39).

Antigamente essa análise era realizada com base em características do processo, tais como ruídos e respingos, já hoje, a estabilidade é avaliada a partir de

diversos métodos e técnicas. Por exemplo, estudo dos índices de regularidade a partir de valores médios e desvios padrão retirados de oscilogramas (tempos de arco aberto, tempos de curto-circuito, picos de corrente de curto-circuito), onde valores menores indicam melhor estabilidade. Ou então, pela existência de um ponto de inflexão a partir do qual valores crescentes ou decrescentes de tensão geram uma menor regularidade, dentre outros (NOGUEIRA *et al.*, 2015, p.02).

Ainda, considera-se que maior frequência de transferência metálica indica maior estabilidade, pois a frequência tende a crescer até um valor máximo quando se aumenta a tensão do arco, para depois cair continuamente para maiores valores de tensão. A explicação para a ocorrência deste fenômeno é que para elevadas tensões de arco, ou seja, arcos de grande comprimento, devem ser esperadas baixas frequências de transferência, afinal a gota cresce antes de destacar. Já para valores baixos de tensão, ou seja, arco curto, a frequência diminui devido ao caráter explosivo, onde o arco atinge um comprimento bastante longo após cada curto-circuito, no qual demora para a ocorrência de uma nova aproximação (NOGUEIRA *et al.*, 2015, p.01).

2.8 FUNDAMENTOS DE VIBRAÇÃO

Segundo Rao (2009, p.06) qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo é denominado vibração ou oscilação. As vibrações podem ser classificadas em três classes: vibração livre e vibração forçada; vibração amortecida e vibração não amortecida; vibração linear e vibração não linear.

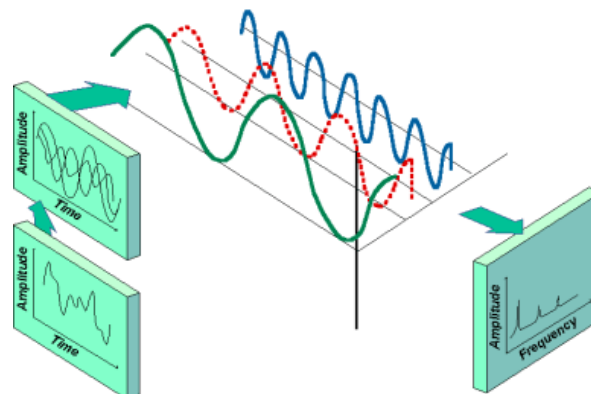
As vibrações em máquinas são causadas pela presença de forças de dinâmica interna e externa ao sistema. A ação das forças é o primeiro evento que ocorre no tempo e dão origem à resposta do sistema, que pode ser medido em deslocamento, que é a distância do afastamento da massa de sua posição natural em metros (m), velocidade que é a derivada da massa que se movimenta em metros por segundo (m/s) e aceleração é a taxa de mudança de velocidade da massa, em metros por segundo ao quadrado (m/s^2) (RAO, 2009, p.11).

Os métodos e técnicas que envolvem medições de vibração são divididos em: técnicas no domínio do tempo, técnica no domínio da frequência e técnicas no domínio

da frequência-tempo. Nos métodos de domínio de tempo: média absoluta (X_{med}), nível global (X_{rms}) e fator de crista (F_{cr}) são os mais simples, sendo este último a razão dos dois primeiros (RAO,2009, p.127).

Os gráficos do sinal no domínio do tempo registram a amplitude em função do tempo, mas quando analisados através do domínio da frequência, a amplitude é apresentada em função da frequência. Como pode ser observado na Figura 9, a identificação dos componentes de frequência de sinais complexos usando o domínio do tempo é muito difícil, então o sinal é transportado para o domínio da frequência para tornar mais simples encontrar comportamentos erráticos que poderiam representar alguma falha ou outro ponto de interesse no sinal. O valor do *Root Mean Square* (RMS) é o nível quadrático médio de um sinal senoidal, sendo uma medida extremamente importante da amplitude, pois mostra a energia média contida em um movimento vibratório.

Figura 9: Comparação da análise de um sinal através dos domínios de tempo e frequência.



Fonte: AROEIRA, 2019, p.05.

Conforme Rao (2009, p.88) acelerômetros são transdutores ou sensores que medem as vibrações de um corpo. E a partir destes sinais é possível determinar o deslocamento e a velocidade de vibração através da integração dos dados obtidos.

O princípio de funcionamento do acelerômetro tem como base os cristais piezoelétricos, que depois de sujeitos à compressão, geram um pequeno sinal elétrico proporcional à aceleração. Quando se encontra em funcionamento, o mesmo acompanha a vibração transmitida pelo equipamento em estudo, a massa no interior do acelerômetro tende a permanecer estacionária no espaço. O tamanho do acelerômetro irá influenciar a gama de frequências utilizável e a sua sensibilidade,

pois quanto maior for o acelerômetro, maior a sua sensibilidade e menor a gama de frequência máxima utilizável.

Arata *et al.* (1981, p.01), utilizou um acelerômetro piezoelétrico com sensibilidade de 100 mV/G para coletar dados da soldagem e avaliar a vibração causada pela transferência do metal para a poça de fusão. O objetivo do trabalho foi relacionar o tipo de transferência com o som do arco elétrico da soldagem.

Segundo Arata *et al.* (1981, p.02), toda vez que as gotículas de solda se chocam com o metal base ou com a poça de fusão será gerado uma amplitude na forma de onda que pode ser detectada utilizando um acelerômetro.

Em uma pesquisa mais avançada, Johnson *et al.* (1991, p.03) acoplaram os sinais de corrente, tensão e ruído para produzir um sistema de análise mais confiável. Para o processo FCAW, Wang *et al.* (1995, p.03) escreveu sobre a previsão dos modos de transferência de metal por meio da análise de sinais adquiridos simultaneamente.

Assim como Lima e Ferraresi (2006, p.07) que desenvolveram uma pesquisa sobre a análise de sinais de corrente e tensão para determinar o modo de transferência do metal.

2.9 TRANSFORMADAS DE FOURIER E SUAS APLICAÇÕES NA SOLDAGEM

O estímulo inicial para a criação da Transformada Rápida de Fourier (FFT), foi a elaboração de um algoritmo, que permite acelerar o processo de interpolação de uma grande quantidade de dados por polinômios trigonométricos, que é um método usado em óptica, mecânica quântica e inúmeros problemas de simulação, sendo de fácil aplicação e com resultados confiáveis. Fourier estabelece formas de representação de um sinal temporal em uma soma de infinitas séries harmônicas, transformando um sinal não determinístico em determinístico.

A análise de Fourier é uma família de técnicas matemáticas, todas elas baseadas na decomposição de sinais em funções harmônicas. Com essa ferramenta, pode se analisar um sinal periódico em termos de seu conteúdo de frequência ou espectro, e também permite estabelecer a dualidade entre o tempo e a frequência, de

modo que as operações no domínio do tempo tenham a sua representação no domínio da frequência.

Usando operações de vetores é possível calcular os coeficientes de Fourier correspondentes a um sinal, em que o vetor \mathbf{n} contenha os índices dos coeficientes e o vetor \mathbf{cn} contenha os coeficientes. Quanto maior for o número de harmônicas utilizadas na expansão em série de Fourier, melhor a reconstrução do sinal. Quando se tem um sinal randômico, utiliza-se o método da Transformada Rápida de Fourier (FFT), onde são identificados componentes complexos no domínio da frequência (STEIN; SHAKARCHI, 2003, p.224).

Considerando a definição da transformada de Fourier no domínio do tempo contínuo. Seja $x(t)$ um sinal de tempo t contínuo, onde sua transformada pode ser definida pela Equação 4.

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (4)$$

Onde $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular, f a frequência temporal dada em hertz, e $j = \sqrt{-1}$ a unidade imaginária. Para que $X(\omega)$ convirja é necessário que $x(t)$ seja integrável em módulo, que tenha um número finito de máximos e mínimos dentro de qualquer intervalo finito, que tenha um número finito de descontinuidades e que cada umas das descontinuidades seja finita (HSU, 2004, p.271). O sinal original é recuperado pela transformada de Fourier inversa no domínio do tempo contínuo, é dado pela Equação 5.

$$X(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (5)$$

Existe também a versão de tempo discreto, obtida a partir da série de Fourier, chamada de transformada de Fourier de tempo discreto, dada pela Equação 6.

$$X(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]e^{-j\omega n} \quad (6)$$

Onde n é o tempo discreto. A inversa da transformada de Fourier de tempo discreto é dada pela Equação 7.

$$X[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} X(\omega) e^{j\omega n} d\omega \quad (7)$$

Onde ω foi obtida de $\omega_0 = 2\pi/N$ com períodos de $N \rightarrow \infty$ (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010, p.208).

Utilizando os números complexos das transformadas de Fourier, podemos tanto representar o histograma randômico em componentes harmônicos no domínio da frequência, quanto utilizar estes componentes no domínio da frequência para representar novamente o sinal no domínio do tempo (OPPENHEIM; WILLSKY, 2010, p.208).

De acordo com Mazzaferro e Machado (2000, p.07), na soldagem subaquática com profundidades (5,0; 12,5 e 20,0 metros), em juntas do tipo filete e simples deposição, com taxa de aquisição de 5 kHz, utilizaram a transformada de Fourier na tensão para avaliar e classificar o arco elétrico.

Segundo Soundararajan *et al.* (2006, p.05) utilizaram a transformada de Fourier na soldagem por fricção e, os resultados mostram que a amplitude do sinal de emissão acústica no domínio da frequência é sensível a alteração na profundidade de penetração da ferramenta.

Conforme Kim *et al.* (2008, p.04) utilizando um microfone na soldagem por laser, comprovaram que as alterações nos sinais com a Transformada de Fourier estão relacionadas com a penetração.

De acordo com Ramos *et al.* (2013, p.06) na soldagem MIG Pulsado utilizaram a transformada de Fourier na tensão e na medição da poça de fusão com perfilografia, para melhorar o acabamento superficial do cordão.

Segundo Loman *et al.* (2013, p.03) empregando um microfone na soldagem MIG, comparando o sinal bom com o ruim de emissão acústica e relacionando os mesmos com defeitos nos cordões de solda.

Conforme Muñoz *et al.*, (2014, p.07) mostraram que na soldagem MIG que os oscilogramas de corrente e tensão, analisados por Fourier podem reconhecer a instabilidade dos sinais, sendo possível determinar quais são os melhores parâmetros

que proporcionam mais homogeneidade no cordão e também uma geometria aceitável.

De acordo com Slania *et al.* (2014, p.02) na soldagem com eletrodo revestido e com diferentes fontes de soldagem obtiveram os sinais elétricos e aplicaram a transformada de Fourier, comparando as soldas com correntes estáveis e instáveis.

2.10 ANÁLISE DE VARIÂNCIA UNIVARIADA (ANOVA)

A variância é uma medida da dispersão dos valores. Quanto mais uniforme os resultados, isto é, mais próximos da média, menor a variância. A análise de variância (ANOVA) é uma técnica que visa comparar médias de forma a definir se elas são significativamente diferentes.

Segundo Fávero (2009, p.421), a ANOVA é uma extensão do teste t de *Student*, e é utilizada para comparar duas médias independentes. De acordo com Hair Júnior *et al.* (2005, p.304) afirma que a Anova é usada para avaliar as diferenças estatísticas entre as médias de dois ou mais grupos.

Segundo Pestana e Gajero (2005, p.148), a análise de variância de um fator, chamada de OneWay Anova, é uma extensão do 'teste t', dessa forma, permite verificar o efeito de uma variável independente qualitativa em uma variável dependente quantitativa. De acordo com Fávero (2009, p.425), a hipótese consiste em testar se as médias das populações são iguais. Assim, cada grupo inclui as observações da variável dependente em uma categoria do fator.

Para Field (2009, p.347), consiste em comparações em pares planejadas para comparar todas as diferentes combinações de grupos testados. Assim, é como tomar todas as diferentes combinações dos grupos que estão sendo testados. Para a utilização do teste *post hoc* foi utilizado o procedimento *Tukey*, que segundo Field (2009, p.375), é recomendado quando os tamanhos das amostras são iguais e se tem certeza de que as variâncias populacionais são semelhantes.

➤ Análise do p-valor da ANOVA

Esse teste determina se existe uma relação linear entre a variável de resposta y e um subconjunto de fatores x_1, x_2, \dots, x_n . As hipóteses apropriadas são:

$$\begin{aligned} H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \\ H_1 = \beta_j \neq 0 \quad (\text{para no mínimo um } j) \end{aligned} \tag{8}$$

O p-valor para cada termo testa a hipótese nula de que o coeficiente é igual a zero (sem efeito). Um p-valor baixo ($< 0,05$) indica que você pode rejeitar a hipótese nula. Em outras palavras, um fator que tenha um p-valor baixo provavelmente será uma adição significativa ao seu modelo, porque as alterações no valor do fator estão relacionadas a alterações na variável resposta. Por outro lado, um p-valor maior (insignificante) sugere que as mudanças no fator não estão associadas a mudanças na resposta.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados todos os materiais e equipamentos que foram necessários para realizar o experimento e obter os resultados desejados. Além disso, é descrita toda a metodologia empregada e etapas executadas para atingir os objetivos estipulados.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Esta pesquisa foi restrita à soldagem de revestimento com o processo de soldagem com arame tubular e proteção gasosa, sendo que a corrente elétrica utilizada em todos os ensaios foi corrente pulsada. O metal de base utilizado foi um aço SAE 1020 da Gerdau com as seguintes dimensões 185,00 mm (comprimento) x 63,50 mm (largura) x 12,70 mm (espessura). A Tabela 1 apresenta a composição química das barras, fornecida pelo fabricante através de certificado de composição química.

Tabela 1 - Composição química das barras de aço SAE 1020.

Elementos	Teor em %	Elementos	Teor em %
C	0,18 a 0,23	P	0,030 máximo
Cr	0,150 máximo	S	0,035 máximo
Cu	0,200 máximo	Si	0,10 a 0,30
Mn	0,30 a 0,60	Sn	0,060 máximo
Ni	0,150 máximo	--	---
Resistência à Tração (Mpa)		440	
Limite de Escoamento (MPa)		330	

Fonte: GERDAU, 2021, p.01.

Na soldagem do cordão, foi utilizado um arame tubular inoxidável martensítico com 1,20 mm (diâmetro), classificado de acordo com a norma ASME 2007, seção II, parte C (AWS SFA 5-22), cuja especificação é AWS EC410NiMo MC da ESAB. A composição química também fornecida pelo fabricante está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química do metal de adição – EC 410 NiMo MC.

Elementos	Teor em %	Elementos	Teor em %
C	0,027	Ni	4,860
Cr	12,500	P	0,024
Mn	0,590	S	0,006
Mo	0,430	Si	0,440
Resistência à Tração (Mpa)		910	
Limite de Escoamento (MPa)		830	

Fonte: ESAB, 2021, p.48.

3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Para realizar a soldagem, utilizou-se uma bancada de ensaios constituída por uma fonte de soldagem, um equipamento de deslocamento da tocha de soldagem, um sistema em módulos para obtenção de sinais simultâneos da (corrente, tensão e aceleração).

✓ Fonte de soldagem Multiprocessos

A fonte de energia multiprocessos utilizada foi a IMC Inversal 450, a qual realiza os processos de soldagem eletrodo revestido, MIG/MAG, TIG e Plasma. Para o desenvolvimento do trabalho foi selecionado o processo MIG/MAG operando no modo imposição de corrente. A fonte de energia utilizada no trabalho apresenta alta tecnologia e versatilidade em equipamentos de soldagem utilizando transistores de potência IGBT's (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), os quais conferem elevada dinâmica e alta eficiência. Entradas e saídas analógicas e digitais para comando por microcomputador ou robô e para aquisição de dados;

As principais características elétricas da fonte são:

- ✓ Fabricante: IMC Soldagem
- ✓ Modelo: Inversal 450
- ✓ Corrente Nominal: 280 A 100% FC
- ✓ Corrente Máxima de 450 A

- ✓ Tensão em Vazio: 68 V
 - ✓ Tensão de alimentação: 220, 380, 440 V 3 ~,
 - ✓ Cos φ : 0,95
 - ✓ Velocidade de alimentação de arame: 1,0 a 20,00 m/min.
-
- ✓ Alimentador de Arame

Este tem como função alimentar o arame consumível através dos guias e conduítes, devendo fornecer uma velocidade de alimentação sempre constante a fim de evitar oscilações no processo.

 - ✓ Fabricante: IMC Soldagem
 - ✓ Modelo: STA-20 / digital
-
- ✓ Tocha de Soldagem

A tocha de soldagem direciona a alimentação de arame e os fluxos de corrente elétrica e gás de proteção para a poça de fusão.

 - ✓ Fabricante: TBI
 - ✓ Modelo: Tocha MIG reta TBI 511 AUT – 2,0 M
 - ✓ Diâmetro utilizável: 1,2 a 2,4 mm
-
- ✓ Sistema de deslocamento da Tocha

O sistema Tartílope V2 é um manipulador robótico para soldagem que possui deslocamento automático com dois graus de liberdade, sendo o “eixo x” para a movimentação longitudinal, e o “eixo y” para movimentação transversal.

 - ✓ Fabricante: SPS – Sistemas e Processos de Soldagem
 - ✓ Modelo: Tartílope V2
 - ✓ Eixo x com deslocamento sobre trilhos rígidos de comprimento de cerca de 1,2 m, mas com possibilidade de conectividade com trilhos adicionais
 - ✓ Eixo y com deslocamento de até 300 mm
 - ✓ Velocidade no eixo x de até 160 cm/min
 - ✓ Velocidade no eixo y de até 300 cm/min

- ✓ Sistema de Aquisição de Dados Modular - NI cDAQ 9172

O Chassi NI cDAQ - 9172 USB com 8 slots, fornece conectividade USB para pequenos sistemas portáteis de medição de sensores. Esse chassi oferece a funcionalidade do recurso "*plug-and-play*" com USB para conectar medições de sinais elétricos e sensores. Além disso, ele controla a temporização, sincronização e transferência de dados entre módulos de E/S da Série C e um host externo.

 - ✓ Fabricante: National Instruments
 - ✓ Modelo: cDAQ – 9172
 - ✓ Números de Entradas: 8 slots

- ✓ Sistema de aquisição de dados NI 9205

O NI-9205 oferece entradas analógicas *single-ended* ou diferenciais, com 4 faixas de entrada programáveis para cada uma delas. O módulo oferece uma ótima combinação de velocidade e quantidade de canais a um baixo custo para o desenvolvimento de sistemas multifuncionais econômicos. Disponibilizando a escolha entre 4 faixas de entrada programáveis. O módulo tem uma barreira dupla de isolamento entre os canais e o terra do sistema, que proporciona segurança, imunidade ao ruído e ampla faixa de tensão no modo comum.

 - ✓ Fabricante: National Instruments
 - ✓ Modelo: NI 9205
 - ✓ Número de Canais: 16 canais diferenciais / 32 canais simples
 - ✓ Resolução: 16 bits
 - ✓ Tempo de conversão (taxa de amostragem máxima): 250 Ks/s

- ✓ Sistema de aquisição de dados NI-9234

O NI-9234 pode medir sinais de sensores piezoelétricos, acelerômetro, tacômetro e sondas de proximidade. O módulo oferece faixa dinâmica, acoplamento CA/CC selecionável por *software* e condicionamento de sinais do padrão IEPE. Seus canais de entrada medem os sinais simultaneamente.

 - ✓ Fabricante: National Instruments
 - ✓ Modelo: NI 9234

- ✓ Transdutor de sinal da corrente para placa de aquisição
Os transdutores de corrente são utilizados para converter corrente em sinais utilizáveis no controle de processos.
 - ✓ Fabricante: SECON – Sensores e Instrumentos
 - ✓ Modelo: 600R010VAC - 220VAC
 - ✓ Tipo de corrente: CC ou CA
 - ✓ Faixa de medição: - 600 a 600A (amperes) para corrente contínua e 0 a 600A (amperes) para corrente alternada

- ✓ Transdutor de sinal da tensão para placa de aquisição
Os transdutores de tensão são utilizados para converter tensões em sinais utilizáveis no controle de processos.
 - ✓ Fabricante: SECON – Sensores e Instrumentos
 - ✓ Modelo: 100V010VAC - 220VAC
 - ✓ Faixa de medição: 0 a 100V (volts) para corrente continua.

- ✓ Acelerômetro industrial (sensores de vibração piezoelétricos)
 - ✓ Fabricante: MMF Industrial Accelerometers
 - ✓ Modelo: KS80D
 - ✓ Sensibilidade: 100 mV/g
 - ✓ Faixa de frequência linear (± 3 dB): 0.13 a 22000 Hz

- ✓ Forno Mufla para aquecimento
Utilizado nos mais diversos laboratórios, para análise de calcinação, tratamentos metalúrgicos, etc...
 - ✓ Fabricante Novatécnica
 - ✓ Modelo: NT-380
 - ✓ Faixa de temperatura: 100 a 1100 (graus Celsius)

- ✓ Termômetro Infravermelho digital portátil
 - ✓ Marca: INSTRUTEMP
 - ✓ Modelo: ITTI-1600
 - ✓ Faixa de temperatura: -32 a 1650 (graus Celsius).

3.3 ENSAIOS PRELIMINARES

Neste trabalho foi realizada a soldagem de revestimento com um único cordão de solda, e alguns parâmetros de soldagem foram mantidos constantes. Também foram determinados quais os parâmetros de soldagem seriam as variáveis de influência, além de seus níveis. Os parâmetros de soldagem mantidos constantes estão apresentados na Tabela 3, sendo os mesmos confirmados com os ensaios preliminares.

Tabela 3 - Parâmetros e níveis mantidos constantes durante a soldagem.

PARÂMETROS	NÍVEL
Polaridade do eletrodo	Corrente Contínua Eletrodo no Positivo (CCEP)
Gás de proteção	98% Argônio + 2% Oxigênio
Ângulo da tocha	90°
Posição de soldagem	Plana
Temperatura de Soldagem	150° C
Quantidade de cordões	1
Corrente de pico	350 A (amperes)

Fonte: Autoria própria.

Determinadas variáveis foram mantidas constantes em todos os ensaios (Tabela 3), tornando-se necessária a concretização de vários ensaios para conseguir as melhores condições de soldagem, sendo que os parâmetros alterados foram analisados. Todos os corpos de prova foram numerados para auxiliar estudos futuros, tornando possível averiguar quais parâmetros foram utilizados nos ensaios.

O equipamento de soldagem utilizado foi uma fonte multiprocessos de 450 amperes, com possibilidade de ajuste na soldagem em regime de tensão constante ou corrente constante, sendo que neste trabalho foi adotado o ajuste em corrente constante.

Para reduzir a quantidade de variáveis durante a soldagem, foram estabelecidos que a vazão do gás, a velocidade de alimentação do arame e o tempo de pico, ficariam mantidos constantes nos ensaios. Para isso, foi necessário estabelecer algumas condições gerais para cada uma das variáveis:

- ✓ Vazão de gás adequada, para evitar turbulências na transferência do metal de adição;
- ✓ Velocidade de alimentação do arame compatível com seu derretimento na poça de fusão, propiciando um arco estável;
- ✓ Tempo de pico ajustado corretamente para que ocorra a transferência de apenas uma gota por pulso na corrente de pico.

A Tabela 4 apresenta as variáveis e os níveis que foram utilizados, para determinar qual nível da variável seria mantido constante durante os ensaios finais, sendo estes níveis confirmados em ensaios preliminares.

Tabela 4 - Parâmetros e níveis utilizados para os ensaios preliminares.

PARÂMENTO	NÍVEL
Vazão de gás	10, 15 e 20 litro/minuto
Velocidade de alimentação do arame	6, 8 e 10 metro/minuto
Tempo de pico (tp)	6, 8 e 10 milissegundos

Fonte: Autoria própria.

Para realizar os ensaios preliminares, foram utilizados os valores máximos para todas as variáveis da Tabela 4, sendo a vazão do gás em 20 L/min.; velocidade de alimentação do arame em 10 m/min. e o tempo de pico em 10 ms. Nestes ensaios, permaneceram fixos os parâmetros de soldagem com seus respectivos níveis apresentados na Tabela 3.

No momento em que a vazão do gás foi fixada em 20 L/min. durante os ensaios houve uma turbulência excessiva na poça de fusão, e com 10 L/min. a proteção da poça de fusão ficou inadequada, sendo a melhor vazão de gás observada a de 15 L/min., sendo adotada em todos os ensaios.

Assim que foi estabelecido o tempo de pico em 10 milissegundos e realizados os ensaios preliminares, foi possível observar que houve o destacamento de uma gota por pulso. Com os tempos de pico estabelecidos em 6 e 8 milissegundos o comportamento do destacamento foi idêntico ao tempo de pico anterior. Com a ajuda da Equação 2 foi possível calcular o coeficiente de destacamento da gota (D) para os três tempos de pico diferente, tendo como resultado os valores 1225 (tp = 10ms), 980 (tp = 8ms) e 735 (tp = 6ms). Os melhores resultados foram obtidos com o tempo de

pico fixo em 8 milissegundos em todos os ensaios, sendo assim fixado o coeficiente de destacamento em 980.

A velocidade do arame para os ensaios preliminares foi fixada em 10 m/min. e a corrente em 230 amperes, utilizando a Equação 2.5 foi possível calcular a constante “k” igual a 0,043. Em outro ensaio preliminar, a velocidade do arame foi fixada em 6 m/min. e a corrente em 230 amperes, com o valor da constante “k” igual a 0,026. Em ambos os ensaios foi possível observar que houve uma instabilidade do arco elétrico, e que a velocidade de alimentação do arame não estava adequada, acarretando falta ou excesso de arame. Em seguida foi realizado outro ensaio no qual a velocidade do arame foi fixada em 8 m/min. e a corrente de 230 amperes, com o valor da constante “k” igual a 0,035, sendo possível constatar um arco mais estável do que às situações anteriores.

Sendo assim, foi fixada a constante “k” em 0,035, e utilizando a Equação 3 foi possível calcular a velocidade do arame para diferentes valores de corrente média utilizadas nos ensaios finais. Na Tabela 5 são apresentados os valores calculados e adotados para os ensaios experimentais/finais.

Tabela 5 - Velocidade do arame calculada para os ensaios realizados.

Corrente Média (A)	170	200	230
K	0,035	0,035	0,035
Velocidade do Arame calculado (m/min)	5,95	7,00	8,05
Velocidade do Arame adotado (m/min)	6,00	7,00	8,00

Fonte: Autoria própria.

3.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Como modelo comum, existe a solução de construir-se uma matriz [m x n], onde m representa o número de variáveis que definem o problema e n, o número de condições (valores) que se deseja atribuir a cada uma dessas variáveis. Desta forma,

definiu-se que seria utilizado um planejamento experimental com 4 variáveis e 3 níveis. As variáveis de influência utilizadas neste trabalho foram:

- 1) A corrente média pulsada,
- 2) A distância bico de contato/peça,
- 3) A velocidade de soldagem,
- 4) Frequência de pulsação.

Em seguida foram realizados alguns ensaios de soldagem, para verificar se os parâmetros (níveis) determinados anteriormente seriam mantidos ou alterados durante a fase final dos experimentos. Após a concretização desses ensaios, os níveis das variáveis de influência da soldagem aplicadas na soldagem de revestimento estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Variáveis de influência da soldagem e seus níveis.

VARIÁVEIS / NÍVEIS	-1	0	1
Corrente Média de Soldagem (amperes)	170	200	230
Distância Bico Contato Peça (mm)	30	33	36
Frequência de Pulsação (Hz)	18,18	20,00	22,22
Velocidade de Soldagem (mm/min.)	300	350	400

Fonte: Autoria própria.

Após a escolha das 4 variáveis e os 3 níveis para cada um dos ensaios, os parâmetros foram inseridos no software MINITAB em uma matriz L9 de TAGUCHI resultando então, nos parâmetros com corrente pulsada a serem aplicados durante os ensaios de soldagem, de acordo com a Tabela 7. Afim de minimizar os erros de funcionamento de algum instrumento, erros de medições, erros do sistema de instrumentação e precisão dos equipamentos, os ensaios foram realizados de forma aleatória sendo a sequência determinada através do software MINITAB, e a sequência de realização dos ensaios para corrente pulsada foram 5, 3, 9, 1, 4, 8, 6, 2, 7.

Tabela 7 - Valores dos ensaios com corrente convencional.

ENSAIOS COM CORRENTE CONVENCIONAL				
Experimento	Corrente média (Amperes)	Frequência de pulsação (Hz)	Velocidade de soldagem (mm/min.)	Distância bico contato peça (mm)
1	170	18,18	300	30
2	170	22,22	350	36
3	170	20,00	400	33
4	200	20,00	300	33
5	200	18,18	350	30
6	200	22,22	400	36
7	230	22,22	300	36
8	230	20,00	350	33
9	230	18,18	400	30

Fonte: Autoria própria.

3.5 CORPO DE PROVAS E SENSORES

Todos os corpos de prova foram inspecionados e devidamente tratados para que nenhum fator de interferência provoque alguma alteração dos resultados. Inicialmente as barras trefiladas de aço SAE 1020, foram cortadas nas dimensões já mencionadas no tópico de materiais utilizados.

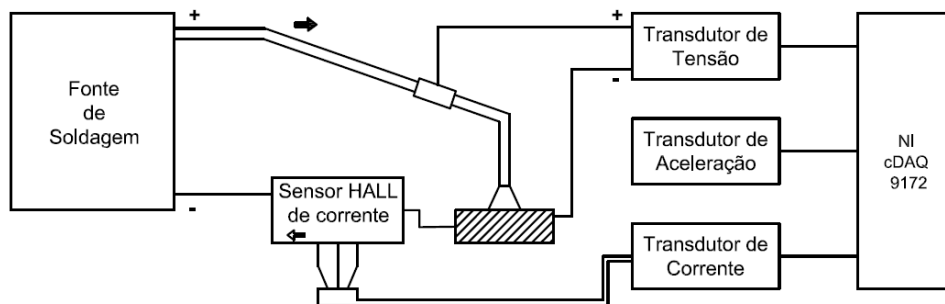
Antes dos corpos de provas serem soldados, todos eles foram submetidos a um processo de jateamento abrasivo com a finalidade de obter uma superfície isenta de graxa, óleo e contaminantes.

No decorrer do processo de soldagem do cordão, foram utilizados sensores (voltímetro, amperímetro e acelerômetro) descritos anteriormente, para adquirir os sinais e, posteriormente, realizar as análises necessárias a fim de obter uma melhor interpretação dos resultados.

Para controlar a temperatura de soldagem em 150° C, antes da soldagem os corpos de prova foram aquecidos a uma temperatura de 200° C por aproximadamente duas horas utilizando um forno mufla. No momento que os corpos de prova alcançavam essa temperatura, os mesmos eram transferidos para a bancada de ensaio e posicionados no dispositivo de fixação, monitorados por um termômetro infravermelho digital.

No momento em que a temperatura superficial do corpo de prova alcançar os 150° C o processo de soldagem é efetuado. Sendo este mesmo procedimento de aquecimento e monitoramento de temperatura adotado em todos os ensaios. A Figura 10 apresenta de maneira esquemática a montagem dos medidores de corrente, tensão e deslocamento utilizados na aquisição dos sinais.

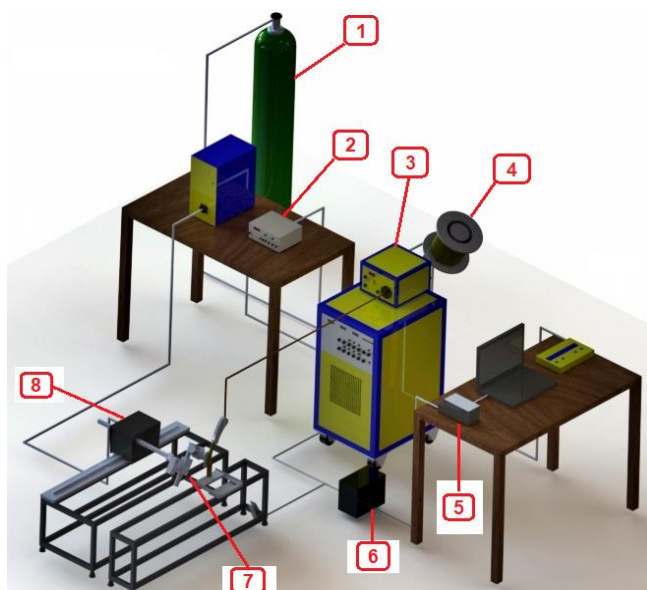
Figura 10: Montagem esquemática da medição da corrente e tensão.



Fonte: Autoria própria.

Para que fosse possível efetuar os ensaios foram construídas duas bancadas, uma para a fixação do sistema de deslocamento da tocha (Tartilope) e outra para a fixação dos corpos de prova. Essa configuração não permite que a influência da vibração no deslocamento da tocha venha afetar os resultados. A Figura 11 apresenta uma visão da bancada de ensaios utilizada durante a realização dos experimentos.

Figura 11: Distribuição e localização dos equipamentos utilizados.

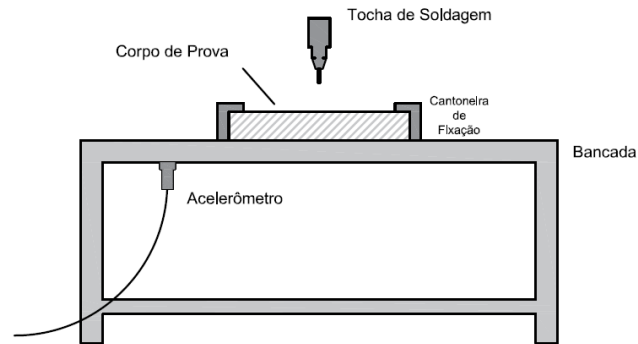


- 1 - Gás de Proteção
- 2 - Medidor de Arame
- 3 - Fonte de Soldagem
- 4 - Metal de Adição
- 5 - Sistema de Aquisição
- 6 - Transdutor Corrente / Tensão / Aceleração
- 7 - Tocha de Soldagem
- 8 - Tartaruga de Soldagem

Fonte: Autoria própria.

A Figura 12 exhibe detalhadamente a bancada onde fixou-se o corpo de prova, na qual o possível observar a posição de fixação do acelerômetro.

Figura 12: Bancada de fixação do corpo de prova.

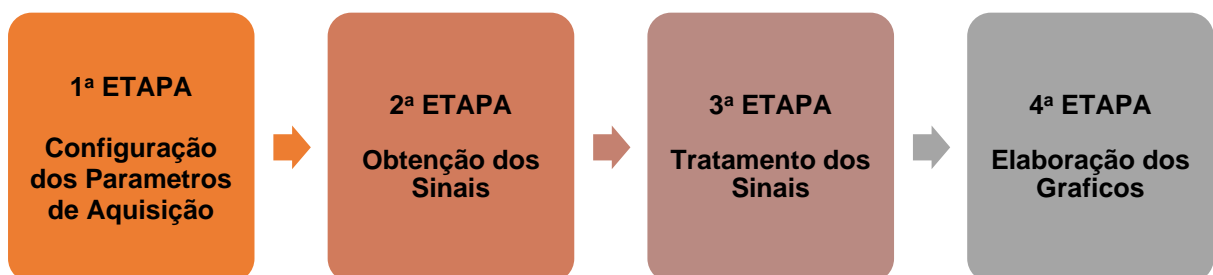


Fonte: Autoria própria.

3.6 OBTENÇÃO DOS SINAIS

A aquisição dos sinais elétricos (corrente, tensão e aceleração) foi realizada com o auxílio do software LabVIEW da *National Instruments*, sendo os programas projetados neste software são denominados instrumentos virtuais ou VI's. Já o tratamento dos sinais obtidos foi realizado com o software MATLAB. A sequência da obtenção e tratamento de sinais está apresentada na Figura 13, sendo que na primeira e segunda etapa foi utilizada a plataforma LabVIEW, e na terceira e quarta etapa o software MATLAB.

Figura 13: Etapas da obtenção e tratamento dos sinais.



Fonte: Autoria própria.

Os sinais obtidos na execução dos ensaios foram desenvolvidos na plataforma LabVIEW, chamados de instrumentos virtuais, e estão apresentados na Tabela 8, com sua funcionalidade.

Tabela 8 - Instrumentos virtuais (VI) utilizados nos ensaios.

Nome do Instrumento Virtual (VI)	Funcionalidade
VI_01.vi	Instrumento Virtual do sistema modular para aquisição de dados (NI cDAQ-9172)
VI_02.vi	Instrumento Virtual de módulo para corrente e tensão (NI 9205)
VI_03.vi	Instrumento Virtual de módulo acelerômetro (NI 9234)
VI_04.vi	Instrumento Virtual de gravação dos sinais de corrente e tensão
VI_05.vi	Instrumento Virtual de gravação dos sinais de aceleração

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 9 apresenta os tipos de sinais e a faixa condicionada obtidos durante o procedimento dos ensaios na soldagem, para serem processados posteriormente com o software MATLAB.

Tabela 9 - Sinais obtidos nos ensaios realizados.

Sinal do processo	Análogo ou digital	Faixa de variação	Faixa condicionada
Tensão do arco	Analógico	0 – 100 V	0 – 10 V
Corrente de Soldagem	Analógico	0 – 600 A	0 -10 V
Deslocamento	Analógico	0,13 – 22000 Hz	100 mV/g

Fonte: Autoria própria.

Os sinais analógicos obtidos simultaneamente (tensão, corrente e aceleração) foram convertidos para digitais pelo sistema de aquisição modular. A determinação da frequência de amostragem deve ser realizada de maneira que se mantenha o equilíbrio entre a qualidade do sinal e a não redundância dos sinais aquisitados. Para se determinar a frequência de amostragem foi adotado o teorema de Nyquist – Shannon (NYQUIST, 2002 apud CORRÊA, 2018, p.70), o qual estipula que, a

quantidade de amostras por unidade de tempo e um sinal, chamada de frequência de amostragem, deve ser maior que o dobro da maior frequência contida no sinal a ser amostrado. Dessa forma é possível reproduzir um sinal integralmente sem erros de frequência de réplicas (*“aliasing”*). Nas configurações da obtenção dos sinais o número de amostras foi de 100.000 pontos, e a taxa de aquisição de 25.600 Hz em todos os ensaios realizados.

Os ensaios foram realizados com corrente pulsada utilizando as metodologias já descritas anteriormente, efetuando a aquisição simultânea dos sinais da corrente, tensão e aceleração a cada experimento conforme a metodologia já descrita

Sendo os mesmos efetuados durante um intervalo de 10 segundos, mas com esse intervalo ficaria impossível verificar as oscilações e picos dos mesmos, então escolhemos um intervalo de 0,5 segundo para melhor visualizar os comportamentos dos sinais analisados.

Para cada um dos experimentos propostos na Tabela 7 foram realizados cinco ensaios, e em cada um dos ensaios foi analisado um intervalo de tempo diferente, para se obter uma noção de como os sinais se comportam ao longo do tempo. Os tempos utilizados em cada um dos ensaios foram distribuídos conforme a Tabela 10.

Tabela 10 - Intervalo de tempo analisado em cada ensaio.

Ensaio	Intervalo de Tempo (segundos)
1	16,0 a 16,5
2	18,0 a 18,5
3	20,0 a 20,5
4	22,0 a 22,5
5	24,0 a 24,5

Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados numéricos e gráficos obtidos através dos procedimentos experimentais dos ensaios preliminares e ensaios finais executados e analisados dentro da metodologia descrita no capítulo 3.

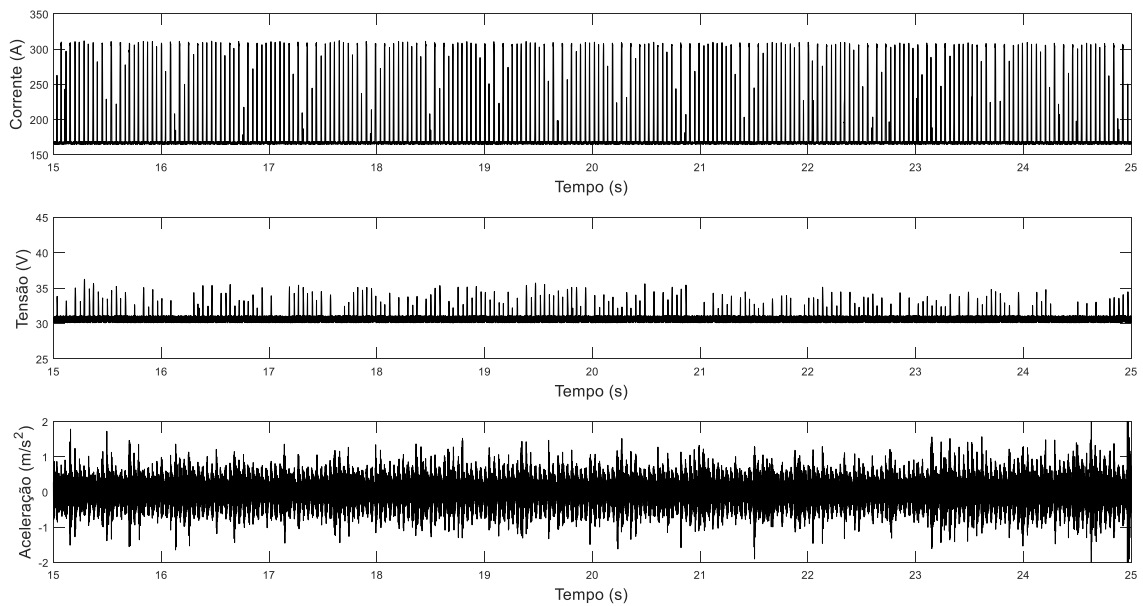
4.1 OBTENÇÃO E ANÁLISE DOS SINAIS

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios, os quais foram realizados com corrente pulsada efetuando a aquisição simultânea dos sinais da corrente, da tensão e da aceleração a cada experimento conforme a metodologia já descrita nas seções 3.4 e 3.6.

Devido à similaridade gráfica dos experimentos envolvendo três situações para cada valor de corrente média (170, 200 e 230 A), será apresentado apenas um gráfico para cada valor de corrente média para simplificar as análises.

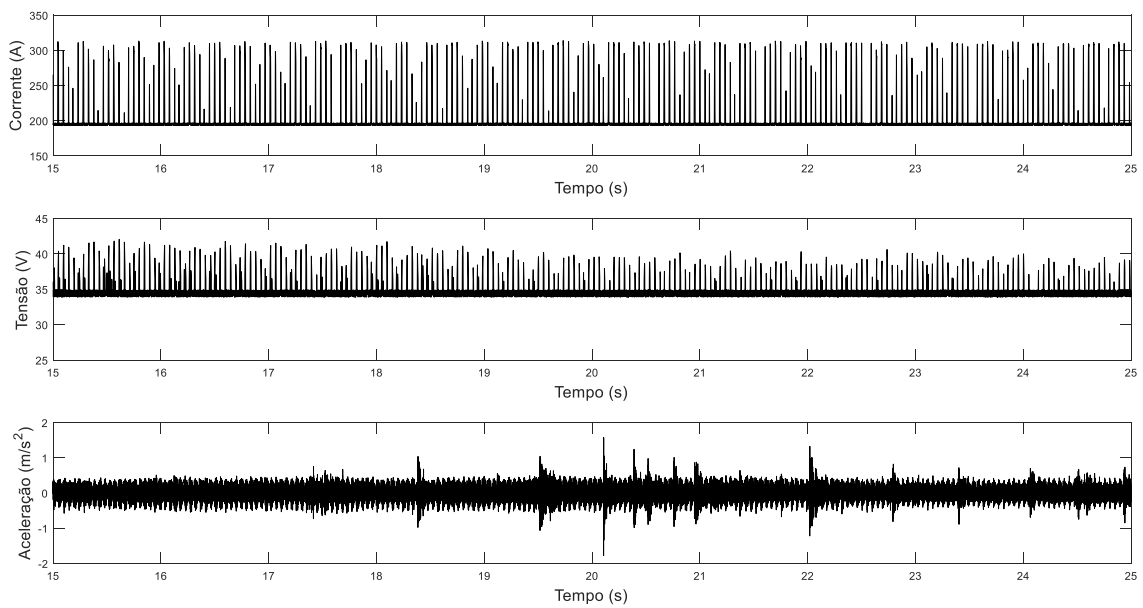
As Figuras 14, 15 e 16 demonstram os sinais obtidos de um dos ensaios com os resultados da corrente, tensão e aceleração RMS (*Root Mean Square*) para um intervalo de 10 segundos, sendo o período entre 15 e 25 segundos. Corrente, tensão e aceleração RMS, significa que estamos referindo a corrente e tensão eficaz, ou seja, quando um equipamento é ligado nem toda corrente e tensão estipulada são absorvidos, portanto, chama-se de corrente e tensão eficaz, aquela que de fato é realmente absorvida.

Figura 14: Sinais de corrente, tensão e aceleração para 170 A / 22,22 Hz / 350 mm/min / 30 mm para 10 segundos.



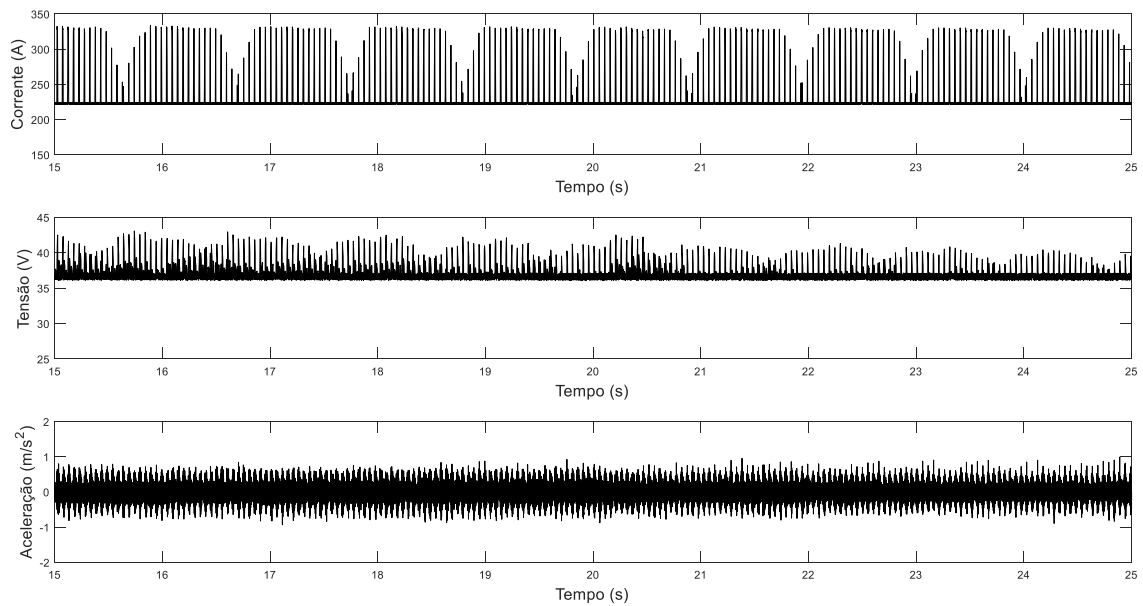
Fonte: Autoria própria.

Figura 15: Sinais de corrente, tensão e aceleração para 200 A / 20,00 Hz / 300 mm/min / 33 mm para 10 segundos.



Fonte: Autoria própria.

Figura 16: Sinais de corrente, tensão e aceleração para 230 A / 18,18 Hz / 400 mm/min / 33 mm para 10 segundos.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 11 apresenta os valores das correntes máximas, mínimas, médias e RMS para os cinco ensaios realizados em cada um dos experimentos. É possível observar que para o mesmo experimento os ensaios apresentaram valores bem próximos.

Tabela 11 - Valores das correntes máximas, mínimas, médias e RMS.

Parâmetros de Soldagem				Ensaio	Resultados para Correntes			
Corrente Média (A)	Frequência de Pulsação (Hz)	Velocidade Soldagem (mm/min)	DBCP (mm)		Corrente Máxima (A)	Corrente Mínima (A)	Corrente Média (A)	Corrente RMS (A)
170	18,18	300	30	1	268,299	177,105	182,319	182,984
				2	266,174	177,347	182,434	183,126
				3	267,226	177,231	181,054	181,824
				4	267,290	178,050	181,726	182,827
				5	267,350	177,095	182,179	183,964
170	22,22	350	33	1	309,991	165,545	180,990	184,159
				2	310,907	166,904	181,846	186,056
				3	309,464	165,510	180,548	184,420
				4	309,481	166,002	182,780	187,047
				5	309,961	164,902	183,031	187,275
170	20,00	400	36	1	289,643	166,501	176,623	178,681
				2	289,172	166,550	178,509	180,946
				3	289,251	166,602	178,827	181,412
				4	287,917	166,525	177,023	179,181
				5	288,901	166,614	179,174	181,752
200	20,00	300	33	1	310,868	193,305	206,056	208,502
				2	311,768	193,574	206,276	208,796
				3	311,912	192,981	205,533	207,131
				4	310,891	193,101	205,770	207,255
				5	310,590	192,430	206,579	208,168
200	18,18	350	36	1	312,359	196,901	206,985	210,417
				2	313,235	197,511	205,437	210,396
				3	317,397	196,502	209,560	211,220
				4	314,900	197,985	208,400	211,116
				5	316,752	197,706	209,601	212,307
200	22,22	400	30	1	311,754	195,145	207,009	209,055
				2	311,143	195,569	206,714	208,767
				3	310,629	194,914	206,475	208,557
				4	308,431	194,990	206,363	208,397
				5	307,522	195,002	206,799	208,812
230	22,22	300	36	1	332,449	221,904	232,656	233,893
				2	325,853	222,151	232,794	234,069
				3	331,571	222,008	232,599	234,008
				4	331,868	221,893	232,292	233,637
				5	329,499	221,745	234,165	235,736
230	20,00	350	30	1	327,268	225,153	235,858	235,295
				2	326,046	224,963	235,438	236,798
				3	326,241	225,302	234,068	235,171
				4	326,138	224,803	234,722	235,943
				5	324,783	225,178	236,804	236,322
230	18,18	400	33	1	332,721	221,152	236,034	236,985
				2	331,916	220,910	236,253	236,191
				3	331,530	220,818	235,037	237,568
				4	330,480	221,305	235,847	237,755
				5	329,948	221,600	236,245	236,877

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 12 apresenta os valores médios e seu desvio padrão para todos os experimentos, e foi possível observar que os mesmos apresentaram um baixo valor de desvio padrão.

Tabela 12 - Valores médios e desvio padrão das correntes.

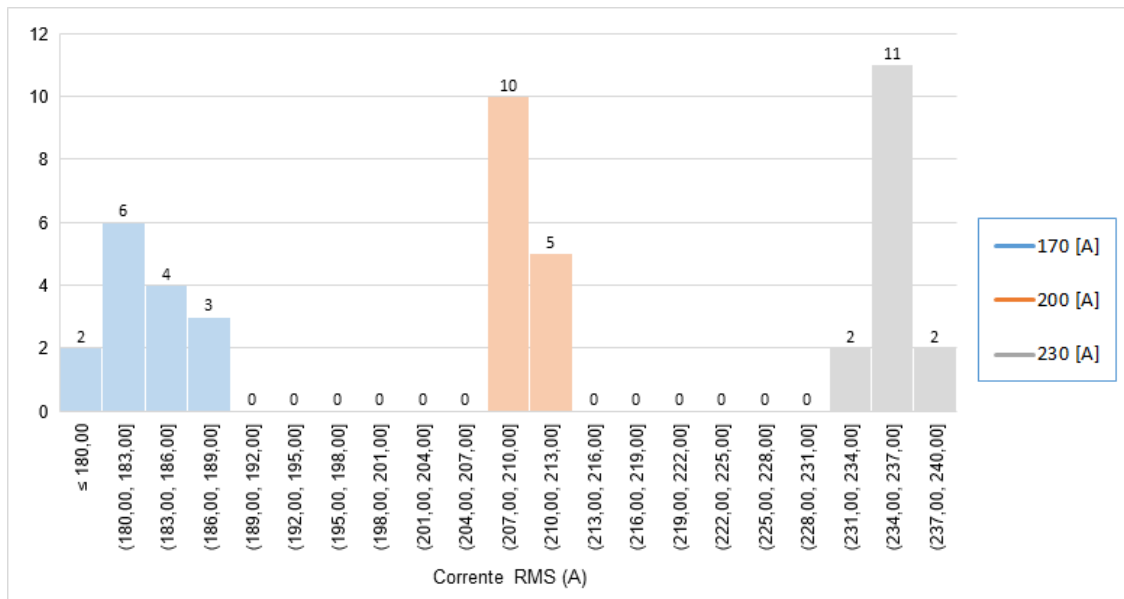
Parâmetros de Soldagem				Valores Médios e Desvio Padrão			
Corrente e Média (A)	Frequência de Pulsação (Hz)	Velocidade Soldagem (mm/min)	DBCP (mm)	Corrente Máxima (A)	Corrente Mínima (A)	Corrente Média (A)	Corrente RMS (A)
170	18,18	300	30	267,290 ± 0,753	177,231 ± 0,396	182,179 ± 0,564	182,984 ± 0,765
170	22,22	350	33	309,961 ± 0,586	165,545 ± 0,743	181,846 ± 1,083	186,056 ± 1,448
170	20,00	400	36	289,172 ± 0,649	166,550 ± 0,048	178,509 ± 1,136	180,946 ± 1,377
200	20,00	300	33	310,891 ± 0,593	193,101 ± 0,426	206,056 ± 0,411	208,168 ± 0,745
200	18,18	350	36	314,900 ± 2,173	197,511 ± 0,606	208,400 ± 1,785	211,116 ± 0,779
200	22,22	400	30	310,629 ± 1,825	195,002 ± 0,262	206,714 ± 0,258	208,767 ± 0,252
230	22,22	300	36	331,571 ± 2,697	221,904 ± 0,150	232,656 ± 0,730	234,008 ± 0,837
230	20,00	350	30	326,138 ± 0,883	225,153 ± 0,196	235,438 ± 1,050	236,295 ± 0,604
230	18,18	400	33	331,530 ± 1,112	221,152 ± 0,314	236,034 ± 0,501	236,985 ± 0,619

Fonte: Autoria própria.

As Figuras 17 e 18 apresentam um histograma e uma curva de distribuição para as três correntes de saída em RMS, onde é possível verificar as oscilações nos valores de saída das correntes devido às alterações nos parâmetros de soldagem (corrente média, frequência de pulsação, velocidade do arame e DBCP). Seguindo os valores da esquerda para a direita, temos inicialmente os valores para a corrente de 170 A, em seguida na região central os valores para 200 A e logo à direita dos gráficos os valores para 230 A.

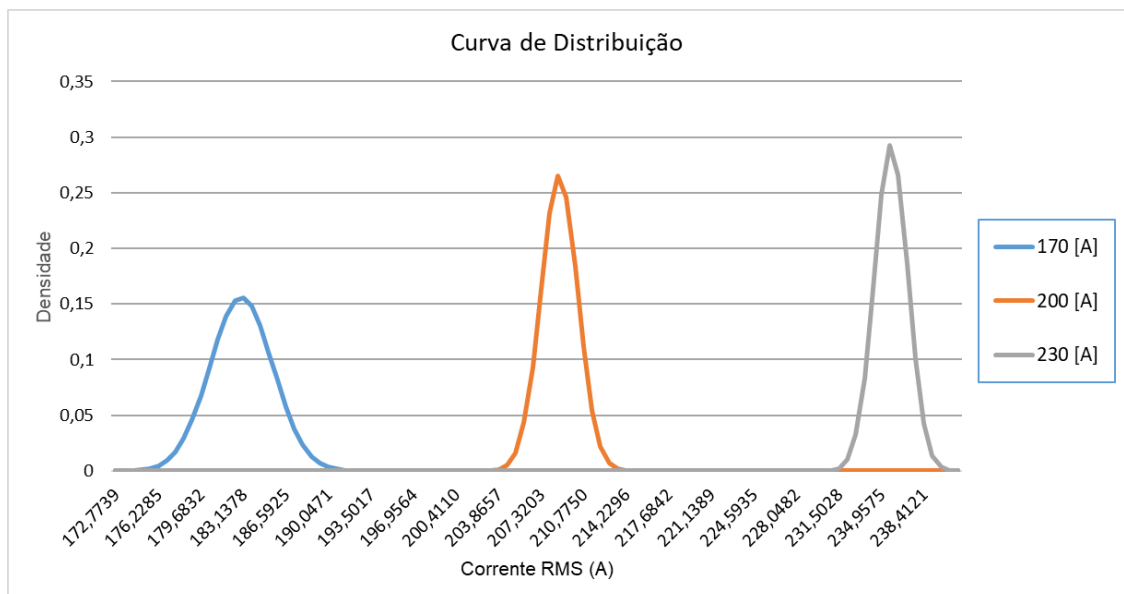
É possível verificar que a corrente de 170 A apresentou mais oscilações nos seus valores de saída, devido aos seus valores ficarem mais espalhados apresentando uma maior variação entre os mesmos e conseqüentemente uma menor densidade dos pontos.

Figura 17: Histograma das correntes.



Fonte: Autoria própria.

Figura 18: Curva de distribuição das correntes.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 13 apresenta os valores das tensões, máximas, mínimas, médias e RMS para todos os ensaios realizados em cada um dos experimentos. É possível observar que para o mesmo experimento os ensaios apresentaram valores bem próximos.

Tabela 13 - Valores das tensões máximas, mínimas, médias e RMS.

Parâmetros de Soldagem				Ensaio	Resultados para Tensões			
Corrente Média (A)	Frequência de Pulsação (Hz)	Velocidade Soldagem (mm/min)	DBCP (mm)		Tensão Máxima (V)	Tensão Mínima (V)	Tensão Média (V)	Tensão RMS (V)
170	18,18	300	30	1	34,602	28,490	29,398	29,421
				2	34,761	28,481	29,654	29,695
				3	34,867	28,501	29,642	29,682
				4	35,070	28,530	29,597	29,637
				5	35,436	28,490	29,576	29,617
170	22,22	350	33	1	34,973	31,003	30,891	31,129
				2	35,410	30,220	30,525	31,038
				3	34,389	30,193	30,745	30,952
				4	35,132	30,175	30,908	31,123
				5	34,871	30,150	30,725	30,930
170	20,00	400	36	1	34,368	28,602	29,519	29,542
				2	35,584	28,581	29,505	29,530
				3	33,419	28,590	29,298	29,309
				4	33,849	28,625	29,345	29,360
				5	35,304	28,590	29,510	29,538
200	20,00	300	33	1	41,229	33,610	35,189	35,235
				2	41,727	33,905	35,110	35,153
				3	39,589	33,701	34,788	34,809
				4	39,544	33,820	34,701	34,716
				5	39,377	34,009	34,669	34,681
200	18,18	350	36	1	41,439	35,160	36,256	36,288
				2	41,481	35,601	36,127	36,160
				3	40,434	34,984	35,782	35,794
				4	40,617	35,032	35,828	35,843
				5	39,876	34,901	35,786	35,798
200	22,22	400	30	1	38,844	32,101	33,129	33,160
				2	38,321	32,344	33,125	33,156
				3	38,283	31,991	33,039	33,068
				4	39,063	32,033	33,133	33,166
				5	39,663	31,860	33,966	34,037
230	22,22	300	36	1	44,266	38,562	39,535	39,557
				2	43,941	38,430	39,473	39,493
				3	42,973	38,641	39,260	39,269
				4	43,231	38,870	39,278	39,288
				5	42,272	38,911	39,155	39,161
230	20,00	350	30	1	42,197	37,102	38,127	38,141
				2	42,346	37,331	38,009	38,018
				3	41,962	36,963	38,043	38,053
				4	41,385	37,293	38,006	38,014
				5	40,728	36,941	37,944	37,949
230	18,18	400	33	1	42,017	38,140	38,781	38,787
				2	42,470	38,402	38,805	38,813
				3	42,501	39,102	38,891	38,902
				4	41,303	39,002	38,757	38,762
				5	41,400	38,141	38,633	38,634

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 14 apresenta os valores médios e seu desvio padrão para todos os experimentos, e foi possível observar que os mesmos apresentaram um baixo valor de desvio padrão.

Tabela 14 - Valores médios e desvio padrão das tensões.

Parâmetros de Soldagem				Valores Médios e Desvio Padrão			
Corrente Média (A)	Frequência de Pulsação (Hz)	Velocidade Soldagem (mm/min)	DBCP (mm)	Tensão Máxima (V)	Tensão Mínima (V)	Tensão Média (V)	Tensão RMS (V)
170	18,18	300	30	34,867 ± 0,321	28,490 ± 0,019	29,597 ± 0,103	29,637 ± 0,110
170	22,22	350	33	34,973 ± 0,376	30,193 ± 0,367	30,745 ± 0,154	31,038 ± 0,092
170	20,00	400	36	34,368 ± 0,926	28,590 ± 0,017	29,505 ± 0,105	29,530 ± 0,112
200	20,00	300	33	39,589 ± 0,321	33,820 ± 0,019	34,788 ± 0,103	34,809 ± 0,110
200	18,18	350	36	40,617 ± 0,376	35,032 ± 0,367	35,828 ± 0,154	35,843 ± 0,092
200	22,22	400	30	38,321 ± 0,926	32,033 ± 0,017	33,129 ± 0,105	33,160 ± 0,112
230	22,22	300	36	43,231 ± 0,791	38,641 ± 0,204	39,278 ± 0,158	39,288 ± 0,165
230	20,00	350	30	41,962 ± 0,666	37,102 ± 0,181	38,009 ± 0,067	38,018 ± 0,070
230	18,18	400	33	42,017 ± 0,569	38,402 ± 0,465	38,781 ± 0,093	38,787 ± 0,096

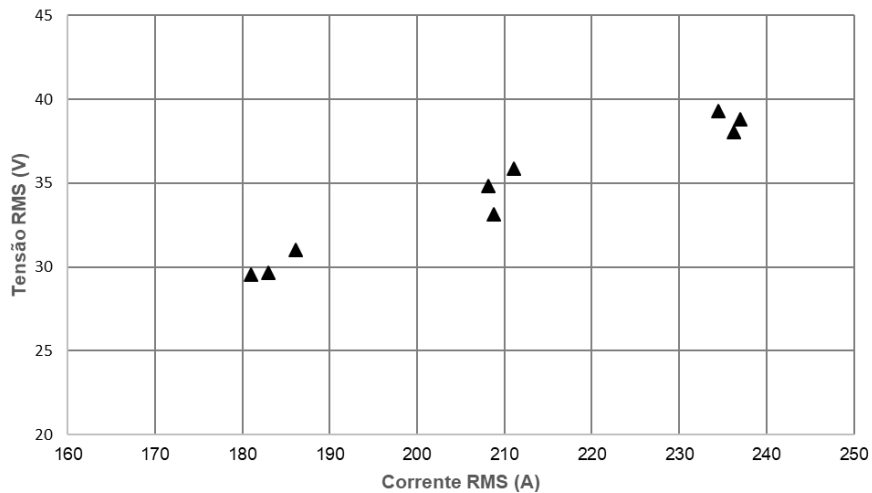
Fonte: Autoria própria.

Com os resultados da corrente em RMS da Tabela 12 e da tensão em RMS da Tabela 14 foi elaborada a Figura 19, onde é possível observar que existem três regiões distintas. Sendo que a região esquerda representa à corrente média de 170 A, a região central corresponde à corrente média de 200 A e a região direita à corrente de 230 A, sendo ainda que o comportamento da tensão é similar.

As melhores correntes de soldagem nos ensaios foram em 230 A, e possivelmente esta condição de corrente seja próxima ou acima da corrente de transição. Esse valor da corrente proporciona um melhor aporte de calor, fazendo com que ocorra um maior aquecimento da ponta do arame por efeito Joule, facilitando a transferência. Para uma melhor compreensão deste fenômeno, seria necessário filmar a transferência durante a soldagem, que não foi o foco deste trabalho, e assim afirmar

corretamente o tipo de transferência, o volume da gota, e a estabilidade ou instabilidade da transferência metálica (CORRÊA, 2018, p.97).

Figura 19: Corrente RMS e tensão RMS.



Fonte: Autoria própria.

Wang *et al.* (1995, p.08) determinaram e classificaram através da amplitude de variação da tensão os modos de transferência metálica para a soldagem com arame tubular e metal de adição, utilizando a transformada rápida de Fourier. De acordo com Starling e Modenesi (2005, p.05); Lima e Ferraresi (2006, p.08) e Lopera *et al.* (2011, p.03) aplicaram shadowgrafia no processo de soldagem com arame tubular para classificar os tipos de transferência metálica.

A Tabela 15 apresenta os valores das amplitudes positivas, amplitudes negativas, amplitude da aceleração e aceleração RMS para todos os ensaios realizados em cada um dos experimentos. É possível observar que para o mesmo experimento os ensaios apresentaram valores bem próximos.

Tabela 15 - Valores das amplitudes, positivas, negativas, amplitude total e aceleração RMS.

Parâmetros de Soldagem				Ensaio	Resultados para Aceleração			
Corrente Média (A)	Frequência de Pulsação (Hz)	Velocidade Soldagem (mm/min)	DBCP (mm)		Amplitude positiva (m/s)	Amplitude negativa (m/s)	Amplitude total (m/s)	Aceleração RMS (m/s)
170	18,18	300	30	1	1,711	-1,702	3,413	0,353
				2	1,688	-1,663	3,351	0,379
				3	1,738	-1,795	3,533	0,368
				4	1,694	-1,734	3,432	0,344
				5	1,640	-1,695	3,335	0,376
170	22,22	350	33	1	1,758	-1,547	3,305	0,311
				2	1,563	-1,639	3,202	0,313
				3	1,517	-1,619	3,136	0,293
				4	1,586	-1,481	3,068	0,307
				5	1,579	-1,575	3,155	0,293
170	20,00	400	36	1	1,639	-1,601	3,240	0,312
				2	1,596	-1,618	3,214	0,309
				3	1,656	-1,617	3,274	0,316
				4	1,632	-1,622	3,254	0,306
				5	1,712	-1,715	3,427	0,325
200	20,00	300	33	1	1,488	-1,513	3,001	0,238
				2	1,544	-1,434	2,979	0,242
				3	1,448	-1,673	3,121	0,247
				4	1,466	-1,528	2,994	0,252
				5	1,526	-1,637	3,163	0,234
200	18,18	350	36	1	1,162	-1,184	2,346	0,237
				2	1,177	-1,115	2,292	0,224
				3	1,090	-1,120	2,211	0,262
				4	1,175	-1,088	2,264	0,264
				5	1,155	-1,156	2,311	0,235
200	22,22	400	30	1	1,113	-1,205	2,318	0,209
				2	1,151	-1,051	2,202	0,207
				3	1,125	-1,112	2,237	0,206
				4	1,043	-1,053	2,097	0,218
				5	1,054	-0,997	2,051	0,211
230	22,22	300	36	1	0,656	-0,718	1,375	0,158
				2	0,595	-0,682	1,277	0,138
				3	0,623	-0,592	1,215	0,148
				4	0,617	-0,699	1,316	0,132
				5	0,665	-0,698	1,363	0,168
230	20,00	350	30	1	0,809	-0,819	1,629	0,173
				2	0,824	-0,818	1,642	0,161
				3	0,846	-0,867	1,713	0,162
				4	0,819	-0,801	1,620	0,164
				5	0,822	-0,802	1,625	0,166
230	18,18	400	33	1	0,815	-0,825	1,640	0,172
				2	0,775	-0,861	1,636	0,160
				3	0,782	-0,877	1,660	0,197
				4	0,795	-0,746	1,542	0,172
				5	0,828	-0,898	1,727	0,166

Fonte: Autoria própria

A Tabela 16 apresenta os valores médios e seu desvio padrão para todos os experimentos, e foi possível observar que os mesmos apresentaram um baixo valor de desvio padrão.

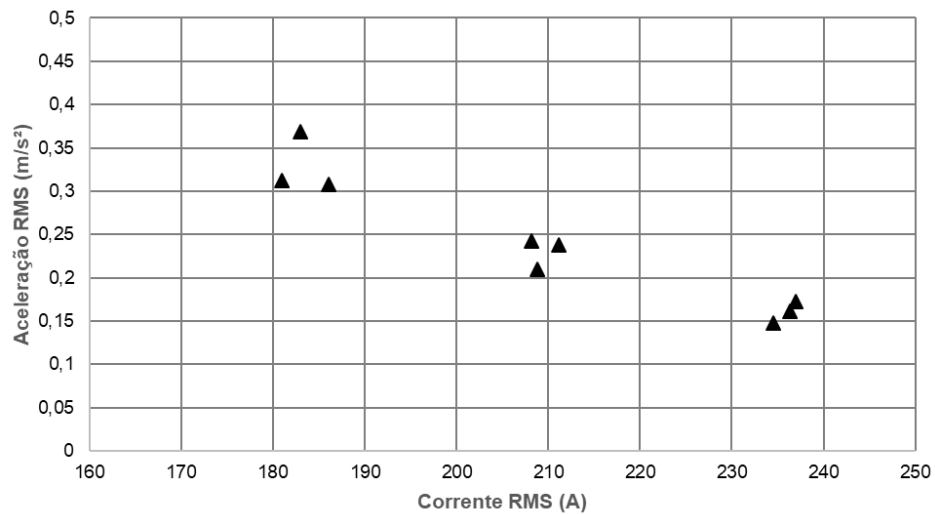
Tabela 16 - Valores médios e desvio padrão das amplitudes e acelerações.

Parâmetros de Soldagem				Valores Médios e Desvio Padrão			
Corrente Média (A)	Frequência de Pulsação (Hz)	Velocidade Soldagem (mm/min)	DBCP (mm)	Amplitude positiva (m/s)	Amplitude negativa (m/s)	Amplitude total (m/s)	Aceleração RMS (m/s)
170	18,18	300	30	1,694 ± 0,035	-1,702 ± 0,050	3,413 ± 0,078	0,368 ± 0,012
170	22,22	350	33	1,579 ± 0,092	-1,575 ± 0,062	3,155 ± 0,082	0,307 ± 0,009
170	20,00	400	36	1,632 0,0,042	-1,618 ± 0,046	3,254 ± 0,083	0,312 ± 0,007
200	20,00	300	33	1,488 ± 0,040	-1,528 ± 0,097	-3,001 ± 0,081	0,242 ± 0,007
200	18,18	350	36	1,162 ^o ± 0,035	-1,120 ± 0,057	2,292 ± 0,050	0,237 ± 0,018
200	22,22	400	30	1,113 ± 0,046	-1,053 ± 0,079	2,202 ± 0,107	0,209 ± 0,004
230	22,22	300	36	0,623 ± 0,029	-0,698 ± 0,049	1,316 ± 0,065	0,148 ± 0,014
230	20,00	350	30	0,822 ± 0,013	-0,818 ± 0,026	1,629 ± 0,038	0,164 ± 0,004
230	18,18	400	33	0,795 ± 0,022	-0,861 ± 0,066	1,640 ± 0,066	0,172 ± 0,014

Fonte: Autoria própria.

Com os resultados da corrente em RMS da Tabela 12 e da aceleração em RMS da Tabela 16 foi elaborada a Figura 19, onde é possível observar que a corrente de 170 A apresentou uma aceleração entre (0,308 a 0,384) m/s², a corrente de 200 A teve uma aceleração entre (0,209 a 0,243) m/s² e para a corrente de 230 A uma aceleração entre (0,149 a 0,172) m/s². Com esses valores foi possível observar que quanto maior o valor da corrente menor o valor da aceleração/deslocamento RMS.

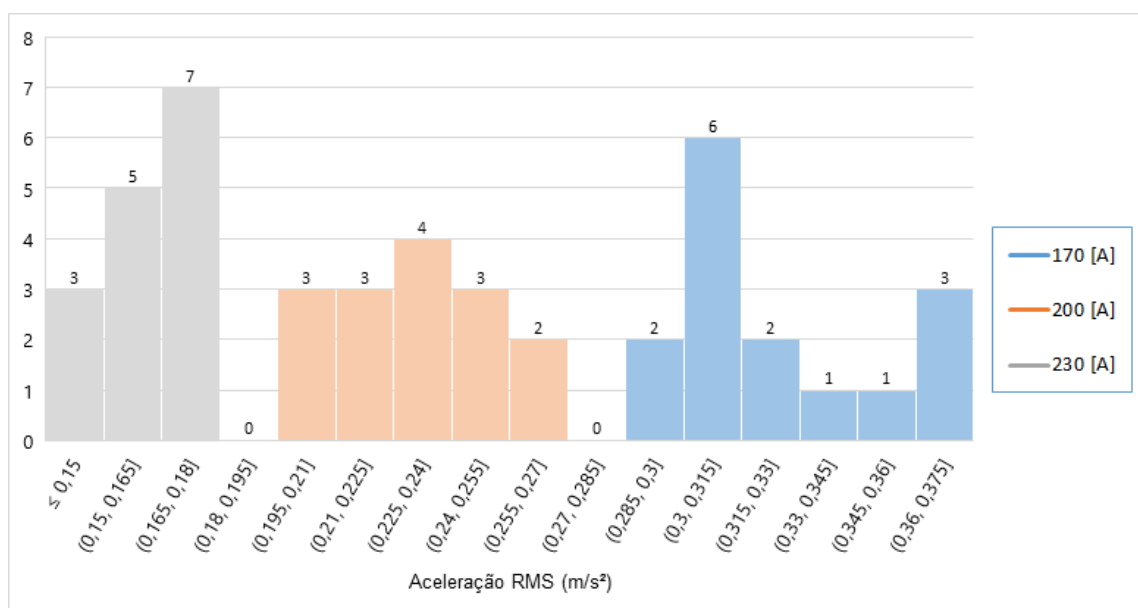
Figura 20: Corrente RMS e Aceleração RMS.



Fonte: Autoria própria.

As Figuras 21 e 22 apresentam um histograma e uma curva de distribuição da aceleração em RMS para as três situações analisadas, onde é possível verificar as oscilações em cada uma destas variáveis com as alterações dos parâmetros de soldagem (corrente média, frequência de pulsação, velocidade do arame e DBCP). Seguindo os valores da esquerda para a direita temos primeiramente os valores para a corrente de 230 A, em seguida na região central os valores para 200 A e logo a direita dos gráficos os valores para 170 A.

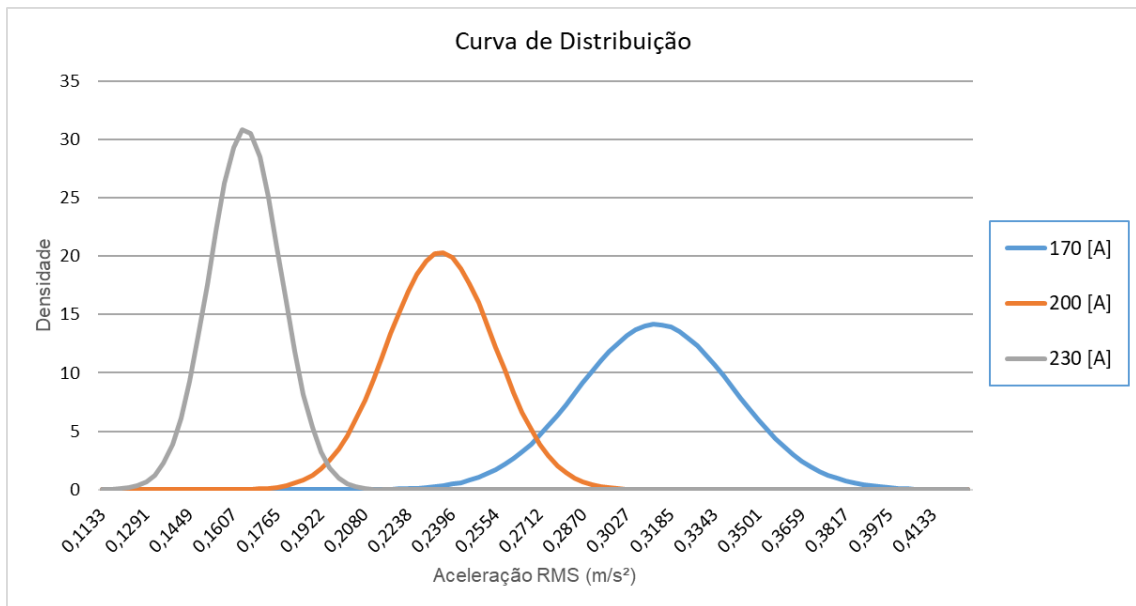
Figura 21: Histograma das acelerações.



Fonte: Autoria própria.

É possível verificar que a corrente de 230 A sofreu menos oscilações, devido aos valores terem ficado mais agrupados apresentando uma menor variação entre si, e conseqüentemente uma maior densidade dos pontos. Com isso vindo a acarretar um menor grau de deslocamento/aceleração tornando o sistema mais estável com um menor índice de vibrações.

Figura 22: Curva de distribuição das acelerações.

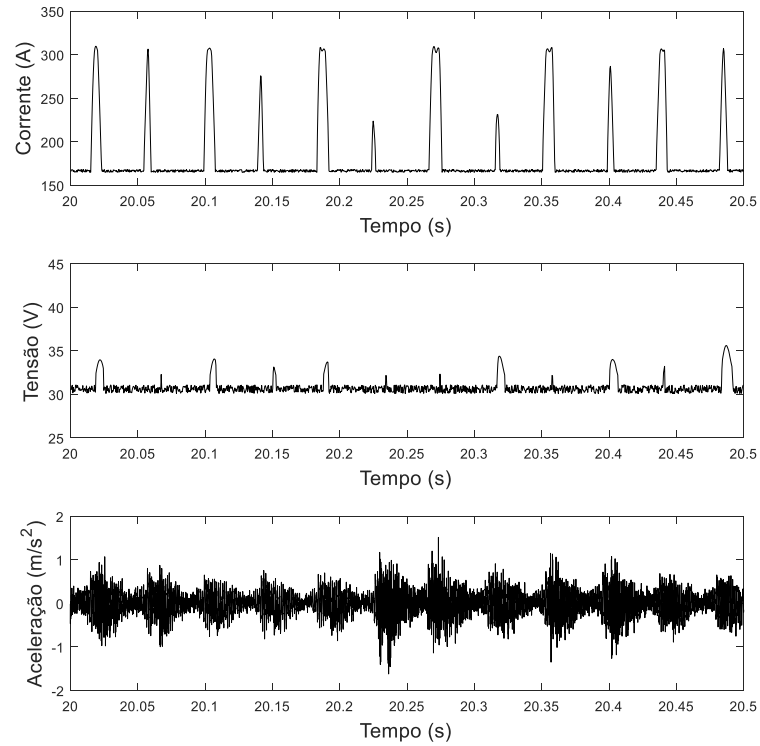


Fonte: Autoria própria.

Para uma melhor compreensão dos resultados dos sinais de corrente, tensão e aceleração em RMS, os sinais foram seccionados em um intervalo de 0,5 segundo, com a seleção de um ensaio para a corrente de 170 A, um ensaio para 200 A e um ensaio para 230 A.

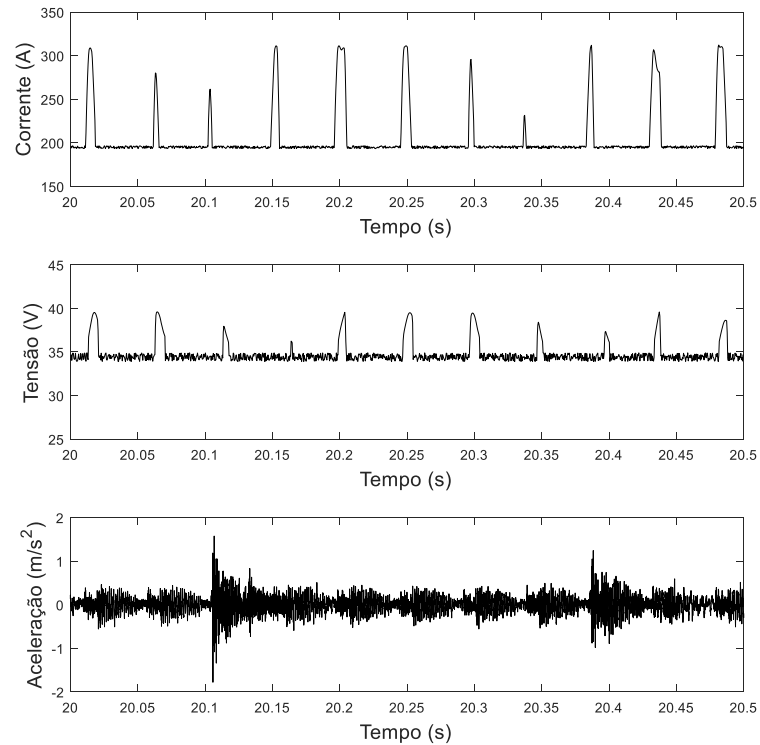
As Figuras 23, 24 e 25 apresentam os sinais sincronizados da corrente, tensão e aceleração, sendo que na Figura 23 a corrente média é de 170 amperes (170 A / 22,22 Hz / 350 mm/mim / 30 mm), na Figura 24 a corrente média é de 200 amperes (200 A / 20,00 Hz / 300 mm/mim / 33 mm) e de 230 amperes (230 A / 18,18 Hz / 400 mm/mim / 33 mm) na Figura 25, tornando-se possível verificar a existência do sincronismo entre os três sinais elétricos.

Figura 23: Sinais da corrente, tensão e aceleração para 170 A / 22,22 Hz / 350 mm/min / 30 mm para 0,5 segundos.



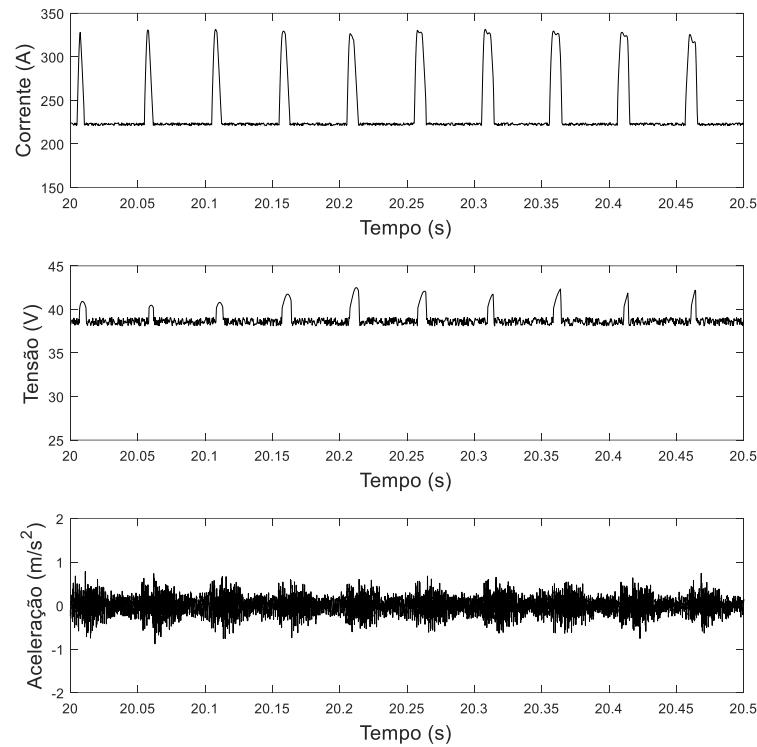
Fonte: Autoria própria.

Figura 24: Sinais da corrente, tensão e aceleração para 200 A / 20,00 Hz / 300 mm/min / 33 mm para 0,5 segundos.



Fonte: Autoria própria.

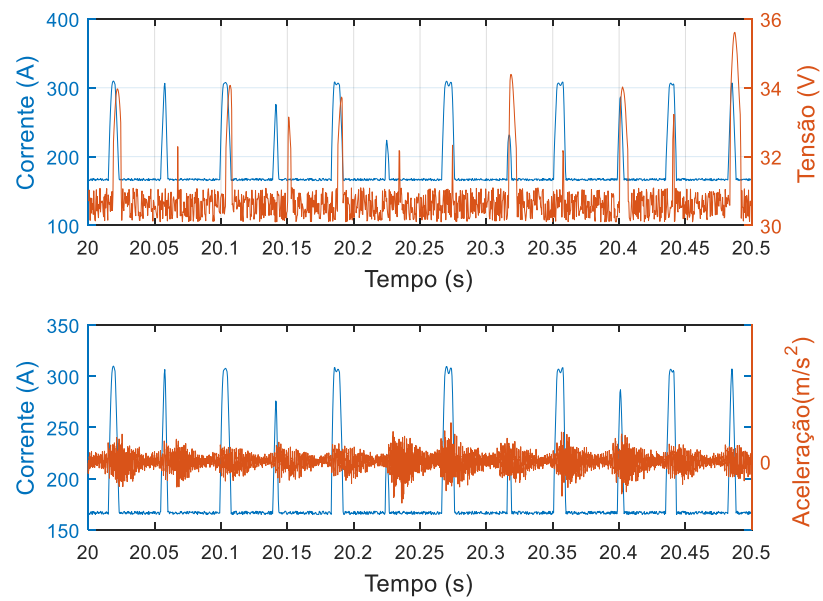
Figura 25: Sinais da corrente, tensão e aceleração para 230 A / 18,18 Hz / 400 mm/min / 33 mm para 0,5 segundos.



Fonte: Autoria própria.

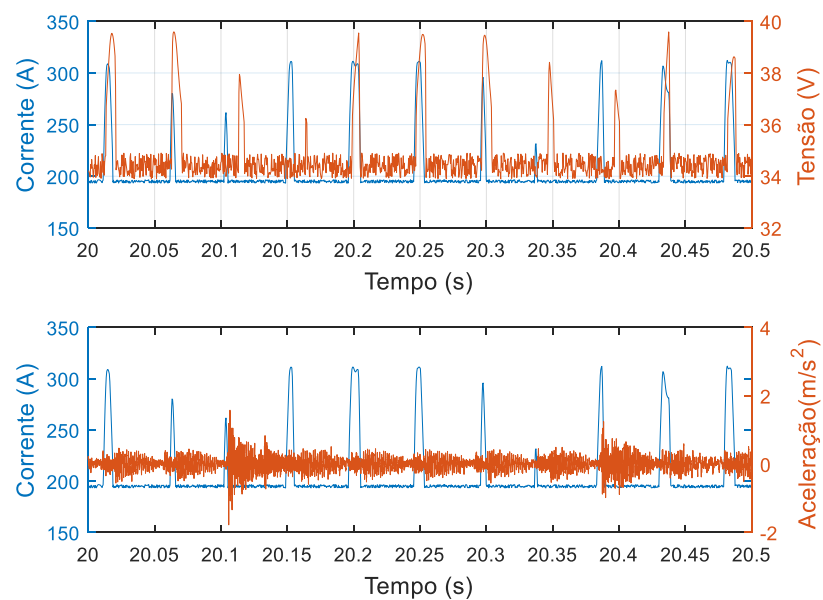
Afim de facilitar a visualização e comprovar o sincronismo dos sinais as Figuras 26, 27 e 28 apresentam os gráficos sobrepostos da corrente com a tensão e também os gráficos sobrepostos da corrente com a aceleração, sendo que na Figura 26 a corrente média é de 170 amperes (170 A / 22,22 Hz / 350 mm/min / 30 mm), na Figura 27 a corrente média é de 200 amperes, (200 A / 20,00 Hz / 300 mm/min / 33 mm) e de 230 amperes (230 A / 18,18 Hz / 400 mm/min / 33 mm) na Figura 28.

Figura 26: Sinais sobrepostos da (corrente e tensão) e (corrente e aceleração) para 170 A / 22,22 Hz / 350 mm/min / 30 mm para 0,5 segundos.



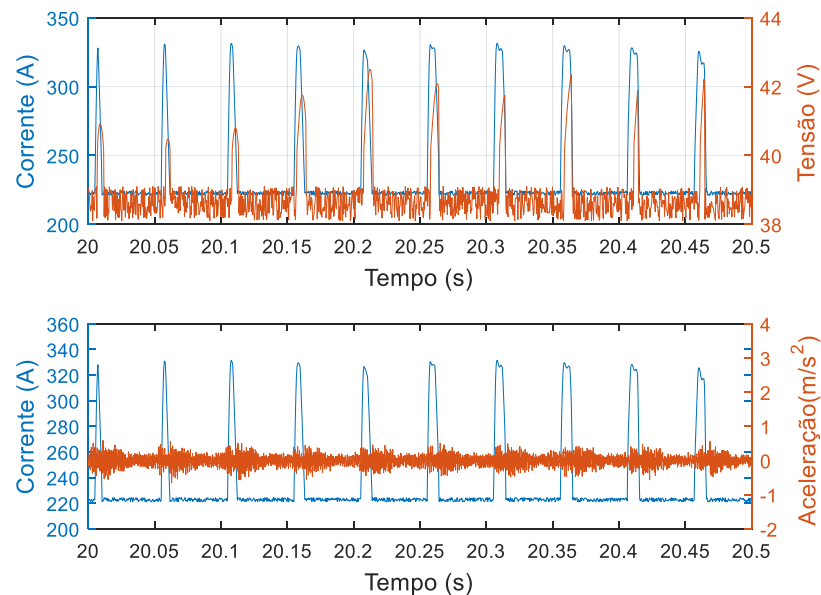
Fonte: Autoria própria.

Figura 27: Sinais sobrepostos da (corrente e tensão) e (corrente e aceleração) para 200 A / 20,00 Hz / 300 mm/min / 33 mm para 0,5 segundos.



Fonte: Autoria própria.

Figura 28: Sinais sobrepostos da (corrente e tensão) e (corrente e aceleração) para 230 A / 18,18 Hz / 400 mm/mim / 33 mm para 0,5 segundos.



Fonte: Autoria própria.

Através das figuras é possível observar que para cada pico de corrente temos um pico de tensão e aceleração. A cada pico de tensão, há uma transferência de material do eletrodo para a poça de fusão, e essa transferência ocorre sempre no tempo de pico. Se houvesse mais de uma gota sendo transferida no tempo de pico ou no tempo de base, existiria outro pico de tensão e corrente neste momento.

Portanto, verifica-se que os destacamentos da gota são uniformes e regulares, e a metodologia adotada para a seleção da corrente pulsada, assim como os níveis adotados, estão de acordo com Palani e Murugan (2006, p.08) demonstrado pelos resultados dos sinais obtidos no intervalo entre 20 e 20,5 segundos, independentemente da corrente média utilizada.

Segundo Dutra (1989, p.03), a estabilidade do processo de soldagem pode ser verificada pela regularidade na formação e destacamento da gota metálica, sendo analisado a partir da repetibilidade dos valores de corrente e tensão obtidos, ou seja, a partir da regularidade da transferência observada nos oscilogramas.

Também foi possível observar através das Figuras 26, 27 e 28 que para a corrente média de 230 A, os sinais apresentaram um melhor sincronismo entre si, e uma menor oscilação no sinal da aceleração, vindo a proporcionar um sistema com melhor estabilidade.

4.2 ANÁLISE DE FOURIER

Nesta seção são apresentados os resultados dos sinais obtidos de forma simultânea para a corrente, tensão e aceleração, onde foi aplicada a transformada de Fourier nesses sinais com o intuito de verificar e analisar suas frequências de oscilação.

Na análise de sinais, o domínio da frequência utiliza a análise de funções matemáticas com respeito à frequência, em contraste com a análise no domínio do tempo. Um gráfico no domínio do tempo mostra como um sinal varia ao longo do tempo; em contraste, um gráfico no domínio da frequência, comumente chamado de espectro de frequências, mostra quanto do sinal reside em cada faixa de frequência. Quando o mesmo sinal é mostrado no domínio da frequência por uma FFT, é possível facilmente medir as frequências harmônicas e as amplitudes (PROAKIS; MANOLAKIS, 2016, p.507).

Quando se analisa um sinal no domínio da frequência, pretende-se essencialmente conhecer o seu comportamento nos sinais periódicos que têm uma frequência associada. Nesse tipo de gráfico, dado um intervalo de frequências, a amplitude definida neste caminho indica a importância relativa do intervalo de frequência para o sinal (PROAKIS; MANOLAKIS, 2016, p.509).

A aplicação da transformada de Fourier neste trabalho teve como objetivo verificar e comprovar se as frequências utilizadas na corrente pulsada estão adequadas ao destacamento da gota. E também verificar se as frequências de pulsação empregadas na fonte, durante a soldagem, são compatíveis com os sinais obtidos. Além disto, verificar se as frequências da corrente, tensão e aceleração no processo de soldagem estão sincronizadas.

A Tabela 17 apresenta os valores das frequências encontradas na corrente, tensão e aceleração para os 5 ensaios realizados em cada um dos experimentos. Onde é possível observar que a frequência determinada como parâmetro de soldagem não foi a mesma encontrada na variável resposta sistema de soldagem, além disso foi possível observar que os sinais de saída da corrente, tensão e aceleração, estão em sincronismo, apresentando sempre a mesma frequência de oscilação.

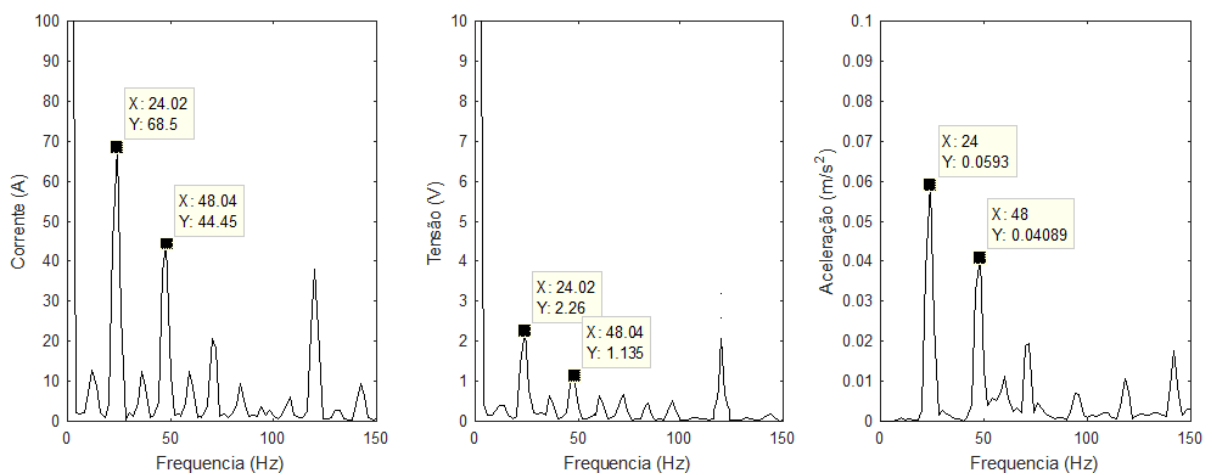
Tabela 17 - Valores das frequências de pulsação obtidas para corrente, tensão e aceleração.

Parâmetros de Soldagem				Ensaio	Frequência de Pulsação Obtida		
Corrente Média (A)	Frequência de Pulsação (Hz)	Velocidade Soldagem (mm/min)	DBCP (mm)		Corrente	Tensão	Aceleração
170	18,18	300	30	1	20,020	20,010	20,010
				2	20,010	20,000	20,020
				3	20,020	20,010	20,020
				4	20,000	20,010	20,000
				5	20,010	20,000	20,010
170	22,22	350	33	1	24,000	24,020	24,010
				2	24,020	24,020	24,010
				3	24,020	24,020	24,000
				4	24,010	24,010	24,020
				5	24,010	24,010	24,010
170	20,00	400	36	1	22,000	22,010	22,000
				2	22,020	22,020	22,010
				3	22,010	22,010	22,000
				4	22,010	22,010	22,010
				5	22,020	22,020	22,010
200	20,00	300	33	1	22,010	22,000	22,010
				2	22,000	22,000	22,020
				3	22,010	22,010	22,000
				4	22,000	22,020	22,000
				5	22,000	22,010	22,010
200	18,18	350	36	1	20,020	20,010	20,010
				2	20,000	20,010	20,000
				3	22,010	20,000	20,010
				4	20,010	20,020	20,020
				5	20,010	20,000	20,020
200	22,22	400	30	1	24,010	24,000	24,010
				2	24,010	24,020	24,010
				3	24,000	24,010	24,000
				4	24,020	24,000	24,000
				5	24,010	24,010	24,020
230	22,22	300	36	1	24,000	24,010	24,000
				2	24,010	24,000	24,010
				3	24,000	24,000	24,020
				4	24,020	24,010	24,000
				5	24,010	24,020	24,010
230	20,00	350	30	1	22,010	22,020	22,000
				2	22,010	22,000	22,020
				3	22,000	22,010	22,000
				4	22,010	22,010	22,010
				5	22,010	22,000	22,010
230	18,18	400	33	1	20,010	20,000	20,010
				2	20,010	20,000	20,020
				3	20,020	20,010	20,000
				4	20,000	20,010	20,000
				5	20,000	20,000	20,010

Fonte: Autoria própria.

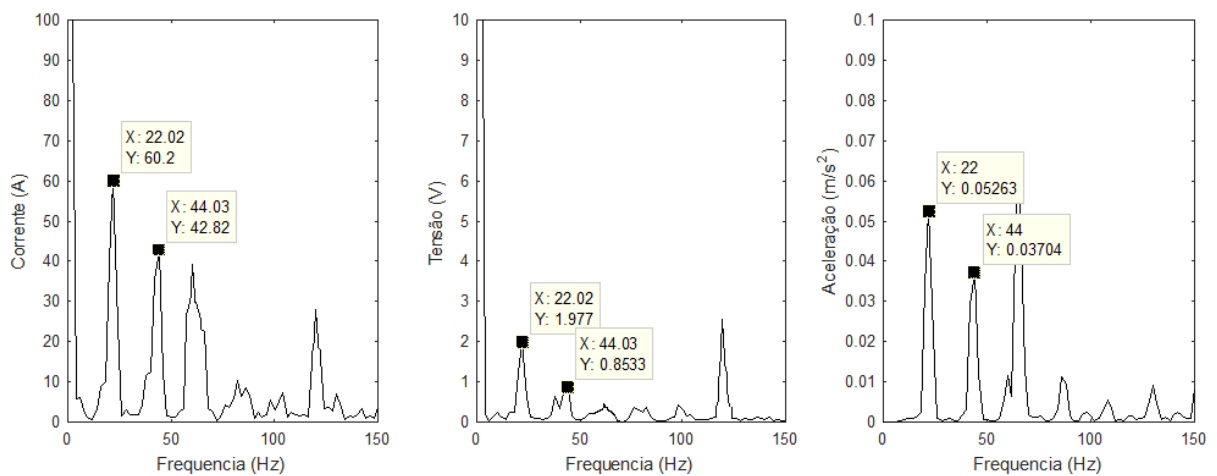
Para uma melhor compreensão e visualização dos sinais de corrente, tensão e aceleração foi aplicada a transformada de Fourier nesses sinais, com uma frequência de corte em 200 Hz. Sendo os resultados apresentados na Figura 29 para a corrente média de 170 amperes (170 A / 22,22 Hz / 350 mm/min / 30 mm), na Figura 30 para a corrente média de 200 amperes (200 A / 20,00 Hz / 300 mm/min / 33 mm) e na Figura 31 para a corrente média de 230 amperes (230 A / 18,18 Hz / 400 mm/min / 33 mm).

Figura 29: Espectros de frequência para 170 A / 22,22 Hz / 350 mm/min / 30 mm.



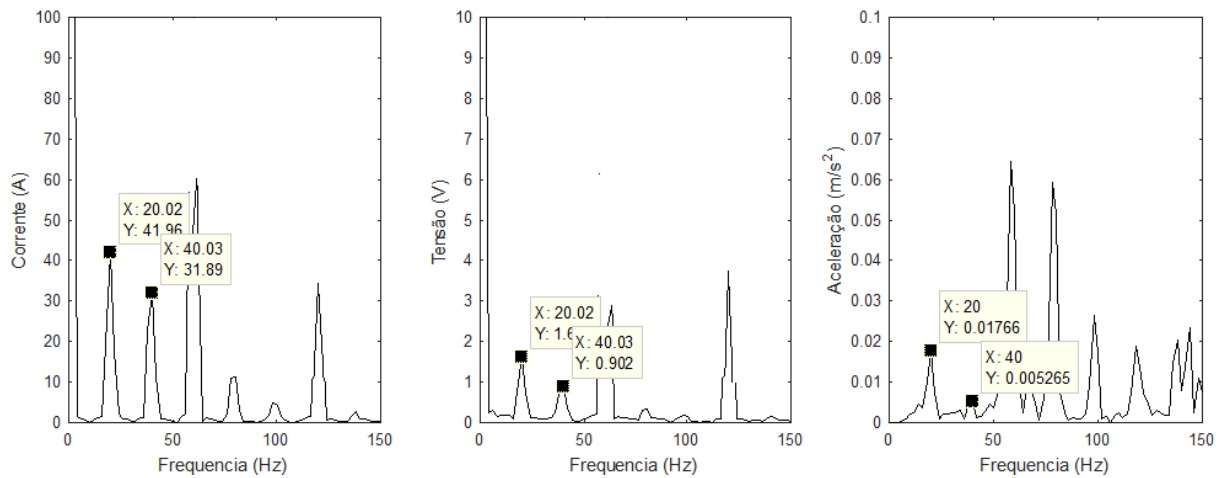
Fonte: Autoria própria.

Figura 30: Espectros de frequência para 200 A / 20,00 Hz / 300 mm/min / 33 mm.



Fonte: Autoria própria.

Figura 31: Espectros de frequência para 230 A / 18,18 Hz / 400 mm/min / 33 mm.



Fonte: Autoria própria.

Foi possível verificar que nas três situações analisadas graficamente (Figuras 29, 30 e 31), existe uma frequência de transferência estável, e próximas das condições propostas nos ensaios para a corrente pulsada, e os sinais obtidos não apresentam irregularidades, considerando este arco estável, o que é comprovado pelas figuras do tópico anterior a qual apresenta os sinais obtidos (corrente, tensão e aceleração). A estabilidade do arco elétrico também foi encontrada, entre outros, por (WANG *et al.*, 1995, p.07; MAZZAFERRO; MACHADO, 2000, p.06; LIMA; FERRARESI, 2006, p.08; PEIXOTO *et al.*, 2011, p.05; MUÑOZ *et al.*, 2014, p.08).

4.3 ANÁLISE NA QUANTIDADE DE PICOS

Nesta seção com o uso da função (*FINDPEAKS*), serão apresentadas as quantidades de picos encontradas nos sinais da corrente, tensão e aceleração, os quais foram seccionados em um intervalo de tempo de 0,5 segundo para facilitar a visualização e interpretação dos mesmos.

A Tabela 18 apresenta a quantidade de picos encontrados na corrente, tensão e aceleração para os cinco ensaios realizados em cada um dos experimentos. Onde é possível observar que as quantidades de picos são diferentes para cada um dos experimentos, devido ao fato de cada experimento ter utilizado uma frequência de entrada diferente como parâmetro de soldagem.

Tabela 18 - Quantidade de picos na corrente, tensão e aceleração.

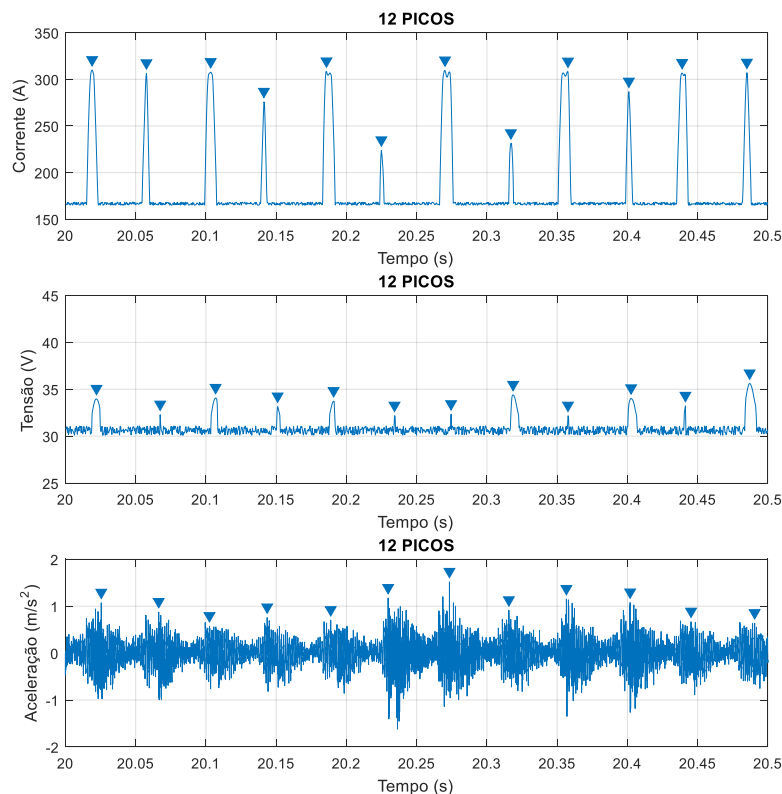
Parâmetros de Soldagem				Ensaio	Quantidade de Picos		
Corrente Média (A)	Frequência de Pulsação (Hz)	Velocidade Soldagem (mm/min)	DBCP (mm)		Corrente (Hz)	Tensão (Hz)	Aceleração (Hz)
170	18,18	300	30	1	10	10	10
				2	10	10	10
				3	10	10	10
				4	10	10	10
				5	10	10	10
170	22,22	350	33	1	12	12	12
				2	12	12	12
				3	12	12	12
				4	12	12	12
				5	12	12	12
170	20,00	400	36	1	11	11	11
				2	11	11	11
				3	11	11	11
				4	11	11	11
				5	11	11	11
200	20,00	300	33	1	11	11	11
				2	11	11	11
				3	11	11	11
				4	11	11	11
				5	11	11	11
200	18,18	350	36	1	10	10	10
				2	10	10	10
				3	10	10	10
				4	10	10	10
				5	10	10	10
200	22,22	400	30	1	12	12	12
				2	12	12	12
				3	12	12	12
				4	12	12	12
				5	12	12	12
230	22,22	300	36	1	12	12	12
				2	12	12	12
				3	12	12	12
				4	12	12	12
				5	12	12	12
230	20,00	350	30	1	11	11	11
				2	11	11	11
				3	11	11	11
				4	11	11	11
				5	11	11	11
230	18,18	400	33	1	10	10	10
				2	10	10	10
				3	10	10	10
				4	10	10	10
				5	10	10	10

Fonte: Autoria própria

As Figuras 32, 33 e 34 apresentam a quantidade de picos para os sinais sincronizados da corrente, tensão e aceleração, sendo que na Figura 32 a corrente média é de 170 amperes (170 A / 22,22 Hz / 350 mm/min / 30 mm), na Figura 33 a corrente média é de 200 amperes (200 A / 20,00 Hz / 300 mm/min / 33 mm) e na Figura 34 a corrente média é de 230 amperes (230 A / 18,18 Hz / 400 mm/min / 33 mm).

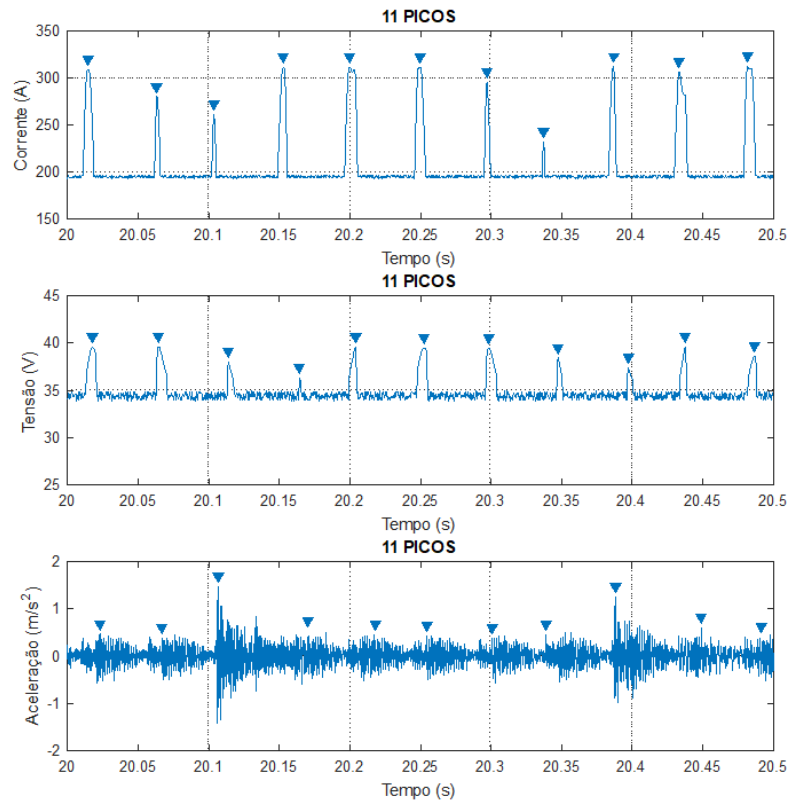
Através das figuras é possível observar que sempre que ocorre um pico na corrente também ocorre um pico na tensão e na aceleração, ocasionando para os três sinais a mesma quantidade de picos e comprovando que ambos estão oscilando na mesma frequência. Sendo que para a Figura 32 temos um total de 12 picos, para a Figura 33 temos um total de 11 picos e para a Figura 34 um total de 10 picos. É possível concluir que os valores das frequências encontradas utilizando a série de Fourier estão de acordo com a quantidade de picos encontradas em um determinado período de tempo.

Figura 32: Quantidade de picos para 170 A / 22,22 Hz / 350 mm/min / 30 mm.



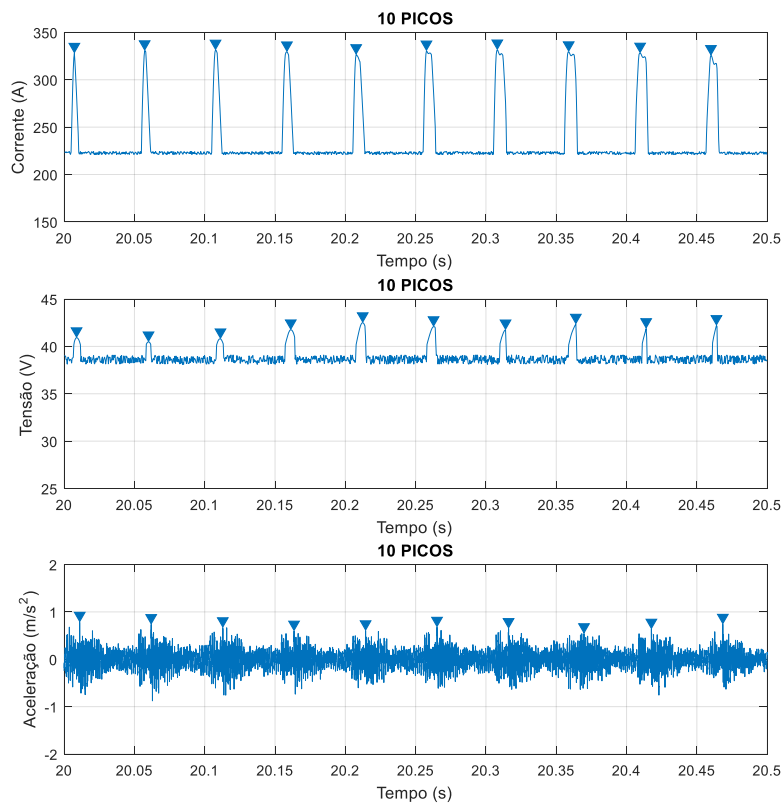
Fonte: Autoria própria.

Figura 33: Quantidade de picos para 200 A / 20,00 Hz / 300 mm/min / 33 mm.



Fonte: Autoria própria.

Figura 34: Quantidade de picos para 230 A / 18,18 Hz / 400 mm/min / 33 mm.



Fonte: Autoria própria.

4.4 INFLUÊNCIAS DA VARIÁVEIS

Nesta seção com o uso do software estatístico MINITAB, são analisadas as influências dos parâmetros de soldagem sobre as variáveis de saída, utilizando três recursos significativos: análise de variância univariada (ANOVA), matriz de correlação e gráfico de efeitos principais.

O presente trabalho tem como variáveis de respostas a aceleração, a frequência de pulsação obtida, a quantidade de picos, a potência eficaz e a amplitude da aceleração. A Tabela 19 apresenta os valores das variáveis obtidas através dos ensaios já mencionados anteriormente.

Tabela 19 - Variáveis de respostas.

Parâmetros de Soldagem				Ensaio	Variáveis de Respostas				
Corrente Média (A)	Freq. Pulsação (Hz)	Velocidade Soldagem (mm/min)	DBCP (mm)		Aceleração RMS (m/s ²)	Freq. Pul. Obitada (Hz)	Quant. de Picos	Potência eficaz (W)	Amplitude da acel. (m/s)
170	18,18	300	30	1	0,353	20,010	10,000	5383,703	3,413
				2	0,379	20,020	10,000	5437,999	3,351
				3	0,368	20,020	10,000	5397,578	3,533
				4	0,344	20,000	10,000	5418,574	3,432
				5	0,376	20,010	10,000	5448,483	3,335
170	22,22	350	33	1	0,311	24,010	12,000	5732,876	3,305
				2	0,313	24,010	12,000	5774,846	3,202
				3	0,293	24,000	12,000	5708,303	3,136
				4	0,307	24,020	12,000	5821,595	3,068
				5	0,293	24,010	12,000	5792,584	3,155
170	20,00	400	36	1	0,312	22,000	11,000	5278,764	3,240
				2	0,309	22,010	11,000	5343,425	3,214
				3	0,316	22,000	11,000	5317,064	3,274
				4	0,306	22,010	11,000	5260,826	3,254
				5	0,325	22,010	11,000	5368,690	3,427
200	20,00	300	33	1	0,238	22,010	11,000	7346,732	3,001
				2	0,242	22,020	11,000	7339,966	2,979
				3	0,247	22,000	11,000	7210,175	3,121
				4	0,252	22,000	11,000	7195,110	2,994
				5	0,234	22,010	11,000	7219,669	3,163
200	18,18	350	36	1	0,237	20,010	10,000	7635,816	2,346
				2	0,224	20,000	10,000	7607,966	2,292
				3	0,262	20,010	10,000	7560,476	2,211
				4	0,264	20,020	10,000	7567,221	2,264
				5	0,235	20,020	10,000	7600,205	2,311
200	22,22	400	30	1	0,209	24,010	12,000	6932,319	2,318
				2	0,207	24,010	12,000	6922,000	2,202
				3	0,206	24,000	12,000	6896,569	2,237
				4	0,218	24,000	12,000	6911,716	2,097
				5	0,211	24,020	12,000	7107,424	2,051
230	22,22	300	36	1	0,158	24,000	12,000	9252,223	1,375
				2	0,138	24,010	12,000	9244,185	1,277
				3	0,148	24,020	12,000	9189,424	1,215
				4	0,132	24,000	12,000	9179,244	1,316
				5	0,168	24,010	12,000	9231,877	1,363
230	20,00	350	30	1	0,173	22,000	11,000	8974,512	1,629
				2	0,161	22,020	11,000	9002,684	1,642
				3	0,162	22,000	11,000	8949,020	1,713
				4	0,164	22,010	11,000	8969,195	1,620
				5	0,166	22,010	11,000	8944,428	1,625
230	18,18	400	33	1	0,172	20,010	10,000	9192,071	1,640
				2	0,160	20,020	10,000	9167,352	1,636
				3	0,197	20,000	10,000	9241,933	1,660
				4	0,172	20,000	10,000	9216,001	1,542
				5	0,166	20,010	10,000	9151,699	1,727

Fonte: Autoria própria,

Segundo Hair Júnior *et al.*, (2005, p.154) para o controle de um processo produtivo utilizaram-se modelos de regressão linear múltipla, com o intuito de estabelecer equações de regressão, ou seja, equações que minimizam os erros baseando-se nas variáveis de interesse e resumindo as informações da análise em uma tabela de Análise de Variância (ANOVA) obtida pela análise de regressão.

A seguir iremos mostrar que através da ANOVA, é possível identificar quais parâmetros de soldagem podem interferir diretamente na variável resposta, sendo esta uma ferramenta para comparação de vários grupos, permitindo investigar a existência de diferenças significativas entre os grupos estudados. Em todas as análises, utilizou-se o apoio computacional do software MINITAB e adotou-se um nível de significância de 5%.

Os resultados obtidos na Tabela 19, foram utilizados para realizar as Análises de Variância (ANOVA) através da modelagem de regressão linear múltipla. Para cada variável de interesse (aceleração, frequência, quantidade de picos, potência eficaz e amplitude da aceleração) foi realizado este procedimento, sendo todos apresentados nas Tabelas 20 a 24.

Tabela 20 - Análise de Variância (ANOVA) para Aceleração.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	4	0,201571	0,050393	84,28	0,000
Corrente Média (A)	1	0,020033	0,020033	33,51	0,000
Frequência de Pulsação (Hz)	1	0,009988	0,009988	16,71	0,000
Velocidade de Soldagem (mm/min)	1	0,034922	0,034922	58,41	0,000
DBCP (mm)	1	0,001311	0,001311	2,19	0,146
Erro	40	0,023916	0,000598		
Total	44	0,225487			

GL: Graus de Liberdade; SQ(Aj): Soma Ajustada dos Quadrados; QM(Aj): Quadrados médio Ajustado; F: fator F; P: fator P.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 21 - Análise de Variância (ANOVA) para Frequência de Pulsação Obtida.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	4	119,668	29,917	3195,98	0,000
Corrente Média (A)	1	0,007	0,007	0,70	0,408
Frequência de Pulsação (Hz)	1	117,291	117,291	12530,03	0,000
Velocidade de Soldagem (mm/min)	1	0,009	0,009	0,98	0,327
DBCP (mm)	1	0,001	0,001	0,06	0,802
Erro	40	0,374	0,009		
Total	44	120,042			

GL: Graus de Liberdade; SQ(Aj): Soma Ajustada dos Quadrados; QM(Aj): Quadrados médio Ajustado; F: fator F; P: fator P.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 22 - Análise de Variância (ANOVA) para Quantidade de Picos.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	4	29,9048	7,4762	3140,18	0,000
Corrente Média (A)	1	0,0019	0,0019	0,80	0,377
Frequência de Pulsação (Hz)	1	29,3077	29,3077	12309,95	0,000
Velocidade de Soldagem (mm/min)	1	0,0023	0,0023	0,97	0,332
DBCP (mm)	1	0,0001	0,0001	0,04	0,842
Erro	40	0,0952	0,0024		
Total	44	30,0000			

GL: Graus de Liberdade; SQ(Aj): Soma Ajustada dos Quadrados; QM(Aj): Quadrados médio Ajustado; F: fator F; P: fator P.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 23 - Análise de Variância (ANOVA) para Potência Eficaz.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	4	85737054	21434264	57,67	0,000
Corrente Média (A)	1	15282444	15282444	41,12	0,000
Frequência de Pulsação (Hz)	1	174027	174027	0,47	0,498
Velocidade de Soldagem (mm/min)	1	9297312	9297312	25,02	0,000
DBCP (mm)	1	485638	485638	1,31	0,260
Erro	40	14866738	371668		
Total	44	100603792			

GL: Graus de Liberdade; SQ(Aj): Soma Ajustada dos Quadrados; QM(Aj): Quadrados médio Ajustado; F: fator F; P: fator P.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 24 - Análise de Variância (ANOVA) para Amplitude da Aceleração.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	4	20,8273	5,20682	38,50	0,000
Corrente Média (A)	1	3,2459	3,24593	24,00	0,000
Frequência de Pulsação (Hz)	1	0,3384	0,33839	2,50	0,122
Velocidade de Soldagem (mm/min)	1	2,5457	2,54572	18,82	0,000
DBCP (mm)	1	0,1184	0,11844	0,88	0,355
Erro	40	5,4103	0,13526		
Total	44	26,2376			

GL: Graus de Liberdade; SQ(Aj): Soma Ajustada dos Quadrados; QM(Aj): Quadrados médio Ajustado; F: fator F; P: fator P.

Fonte: Autoria própria.

Para facilitar a compreensão foi elaborada a Tabela 25, a qual apresenta os resultados da ANOVA para um intervalo de confiança de 95%, referentes aos ensaios, para cada uma das variáveis de influência apresentadas nas Tabelas 20 a 24, confirmando ou não, se cada variável afetou individualmente os resultados obtidos. Com base em uma distribuição de probabilidade F-Snedecor (também conhecida

como distribuição de Fisher), quando o p-valor é menor que 0,05 (5%), pode-se afirmar que esta variável individualmente afetou a variável de resposta, pois levou a rejeição da hipótese de nulidade e, com isso pode-se afirmar que esta variável influencia o valor da variável resposta de interesse. Quanto mais próximo de zero o fator-p, maior a influência na variável de resposta.

Tabela 25 - Análise de Variância (ANOVA) obtida através da Análise de Regressão para as variáveis de resposta (p-valor).

Fator - p	Aceleração	Frequência Pulsção Obtida	Quant. de Picos	Potência	Amplitude Aceleração
Corrente Média (A)	0,000	0,408	0,377	0,000	0,000
Frequência de Pulsção (Hz)	0,000	0,000	0,000	0,498	0,122
Velocidade de Soldagem (mm/min)	0,000	0,327	0,332	0,000	0,000
DBCP (mm)	0,146	0,802	0,842	0,260	0,355

Fonte: Autoria própria.

É possível observar através da Tabela 25 que a corrente média afetou as variáveis de respostas [aceleração, potência e amplitude da aceleração]. A frequência de pulsção afetou as variáveis de resposta [aceleração, frequência de pulsção obtida e quantidade de picos]. A velocidade de soldagem afetou as variáveis de respostas [aceleração, potência e amplitude da aceleração]. A distância bico de contato peça (DBCP) não afetou nenhuma das variáveis de respostas.

Na Tabela 26 é apresentada uma matriz de correlação Pearson, a qual é uma ferramenta importante e poderosa, utilizada para facilitar a compreensão das relações entre as variáveis, onde é possível observar o grau pelo qual o par de variáveis estão relacionadas.

Tabela 26 - Matriz de correlação entre as variáveis de resposta.

	Aceleração (RMS)	Freq. Pulsação Obtida	Quant. de Picos	Potência	Amplitude Aceleração
Aceleração (RMS)	1,000				
Freq. Pulsação Obtida	-0,219	1,000			
Quant. de Picos	-0,220	1,000	1,000		
Potência	-0,941	-0,025	-0,024	1,000	
Amplitude aceleração	0,936	-0,120	-0,120	-0,937	1,00

Fonte: Autoria própria.

É possível observar através da Tabela 26 que a variável aceleração apresenta uma correlação indireta e forte com a [potência] e uma correlação direta e forte com a [amplitude da aceleração], A variável frequência de pulsação obtida apresenta uma correlação direta e forte com a [quantidade de picos]. A variável potência apresenta uma correlação indireta e forte com a [amplitude da aceleração]. Sendo todas as correlações fortes, por terem seus valores bem próximos de 1 para direta e bem próximos de -1 para indireta. E por meio da Tabela 27 é possível observar a correlação de Pearson pareadas.

Tabela 27 - Correlação de Pearson pareadas.

Amostra 1	Amostra 2	Correlação	IC de 95% para ρ	Valor-p
Freq. Pulsação Obtida	Aceleração (RMS)	-0,219	(-0,482; 0,079)	0,148
Quant. de Picos	Aceleração (RMS)	-0,220	(-0,483; 0,078)	0,146
Potência	Aceleração (RMS)	-0,941	(-0,967; -0,894)	0,000
Amplitude Aceleração	Aceleração (RMS)	0,936	(0,885; 0,964)	0,000
Quant. de Picos	Freq. Pulsação Obtida	1,000	(1,000; 1,000)	0,000
Potência	Freq. Pulsação Obtida	-0,025	(-0,316; 0,271)	0,871
Amplitude	Freq. Pulsação Obtida	-0,120	(-0,399; 0,180)	0,433
Potência	Quant. de Picos	-0,024	(-0,315; 0,271)	0,875
Amplitude Aceleração	Quant. de Picos	-0,120	(-0,400; 0,180)	0,431
Amplitude Aceleração	Potência	-0,937	(-0,965; -0,887)	0,000

Fonte: Autoria própria.

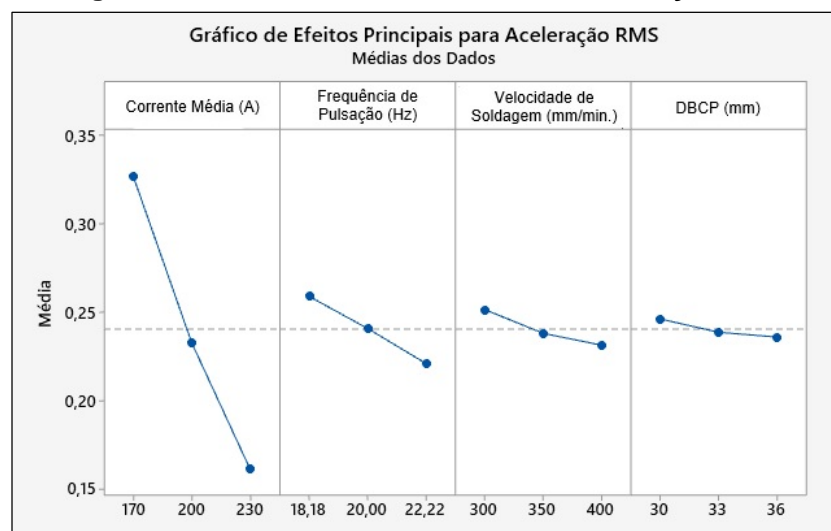
Tornando possível observar que a variável de resposta aceleração apresenta uma correlação indireta no valor de -0,941 com a potência e um valor-p igual a 0,000 e uma correlação direta no valor de 0,936 com a amplitude da aceleração e um valor-p igual a 0,00. A variável de resposta frequência de pulsação obtida apresenta uma

correlação direta no valor de 1,000 com a quantidade de picos e um valor-p igual a 0,000. A variável de resposta potência apresenta uma correlação indireta no valor de -0,937 com a amplitude da aceleração e um valor-p igual a 0,000. Como o valor p foi inferior a 0,005 é possível afirmar que existe uma intervenção entre elas.

Para uma melhor interpretação dos resultados obtidos com a ANOVA foi utilizado um recurso do MINITAB chamado gráfico de efeito principais das variáveis, onde sua interpretação é realizada de forma bem simplificada, afinal quanto maior a diferença de inclinação entre as linhas, maior será a interação da variável. Logo quando as linhas forem praticamente paralelas, não há nenhuma interação da variável com a resposta. Para cada variável de resposta foi realizado este procedimento sendo os mesmos apresentados pelas Figuras 35 a 39, associando cada parâmetro a cada resposta estudada.

É possível observar através da Figura 35, que a média da aceleração RMS foi 0,240 m/s². E o comportamento da aceleração aconteceu como esperado, ou seja, quanto maior a corrente média menor a aceleração. As variáveis que afetaram com maior intensidade foram a corrente média (P=0,000), a frequência de pulsação (P=0,000) e a velocidade de soldagem (P=0,000). Já a DBCP não rejeitou H₀, apresentando um (P=0,146) e individualmente não afetou a variável de resposta.

Figura 35: Efeitos das variáveis sobre a Aceleração RMS.



Fonte: Autoria própria.

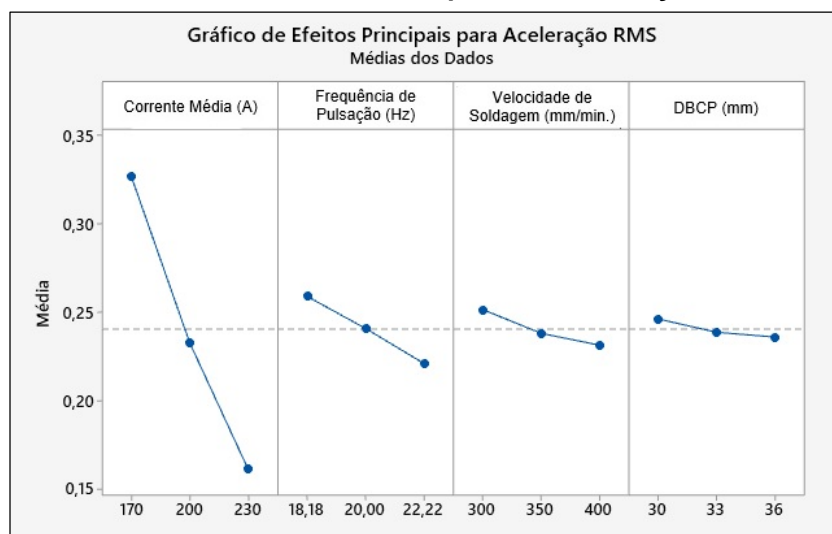
A mesma faixa de resultados também foi encontrada por Arata *et al.* (1981, p.07) que utilizou um acelerômetro para analisar a vibração do metal base durante e

processo de soldagem e Wang *et al.* (2011, p.10) ao realizar a aquisição dos sinais de vibração do eletrodo para monitorar a qualidade da solda.

Observa-se através da Figura 36, que a média da frequência de pulsação obtida da corrente foi 22,008 Hz. E o comportamento da frequência aconteceu como esperado, ou seja, a frequência de entrada irá alterar diretamente na frequência de resposta. A única variável que afetou o seu comportamento foi a frequência de pulsação ($P=0,000$). As outras variáveis, tais como corrente média, velocidade de soldagem e DBCP apresentaram uma linha horizontal paralela ao eixo x, a qual significa não haver nenhum efeito principal presente.

Resultados semelhantes também ocorreram em uma pesquisa realizada por Grad *et al.* (2004, p.02) ao estudar a viabilidade dos sinais acústicos para monitoramento on-line do curto circuito na soldagem a arco e Zanini (2020, p.123) ao realizar o monitoramento e aquisição dos sinais elétricos do arco e seus efeitos na poça de fusão.

Figura 36: Efeitos das variáveis sobre a Frequência de Pulsação Obtida da Corrente.



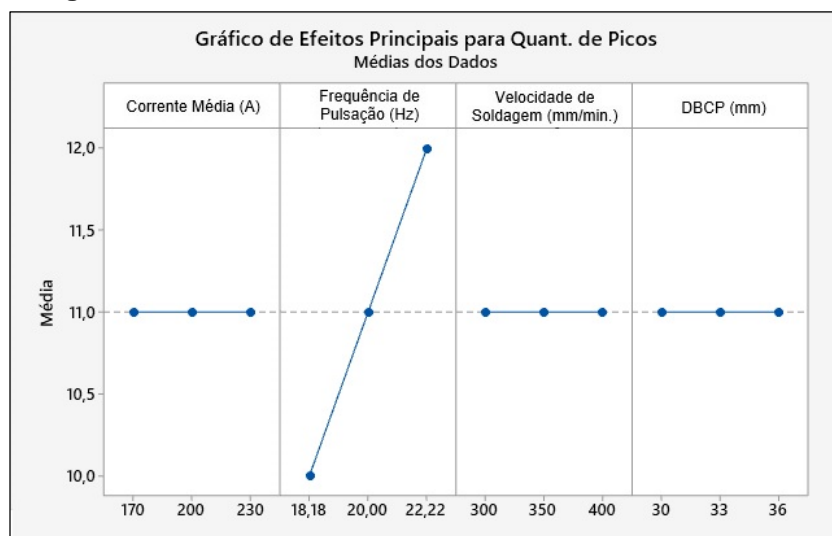
Fonte: Autoria própria.

Constata-se por meio da Figura 37, que a média da quantidade de picos foi 11,000. E seu comportamento ocorreu como esperado, pois quanto maior for a frequência maior será a quantidade de picos em determinado período. A única variável que afetou o seu comportamento foi a frequência de pulsação ($P=0,000$). As outras variáveis, tais como corrente média, velocidade de soldagem e DBCP apresentaram

uma linha horizontal paralela ao eixo x, a qual significa não haver nenhum efeito principal presente.

Os mesmos resultados também foram encontrados por Cayo (2008, p.53) ao realizar a aquisição dos sinais de tensão, corrente e pressão acústica do arco elétrico no processo GMAW visando determinar a estabilidade do processo e Azevedo (2019, p.42) realizando a aquisição dos sinais elétricos de corrente e tensão do arco para avaliar os aspectos operacionais do processo de soldagem.

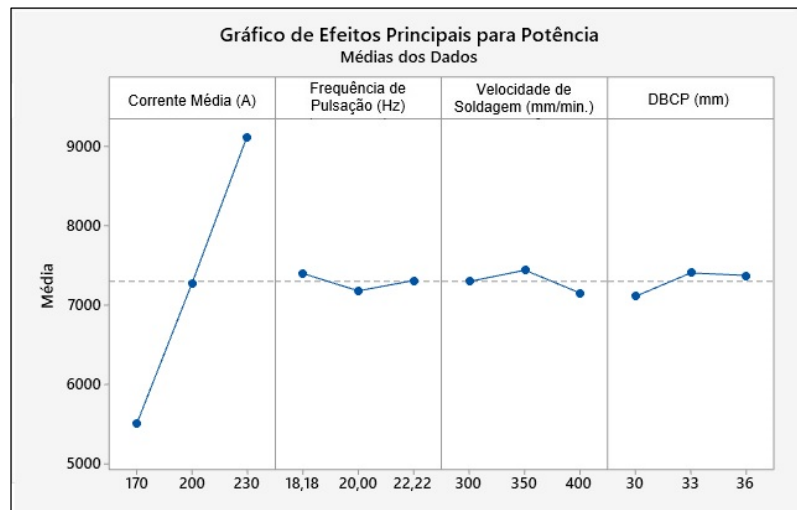
Figura 37: Efeitos das variáveis sobre a Quantidade de Picos



Fonte: Autoria própria.

É possível observar através da Figura 38, que a média da potência eficaz foi 7.298,767 W. E o comportamento da potência ocorreu como previsto, ou seja, quanto maior a corrente média maior a potência. As variáveis que afetaram com maior intensidade foram a corrente média ($P=0,000$) e a velocidade de soldagem ($P=0,000$). Já a frequência de pulsação e a DBCP, apresentou um valor de P superior a 0,05 consequentemente não rejeitou H_0 e individualmente não afetou a variável de resposta.

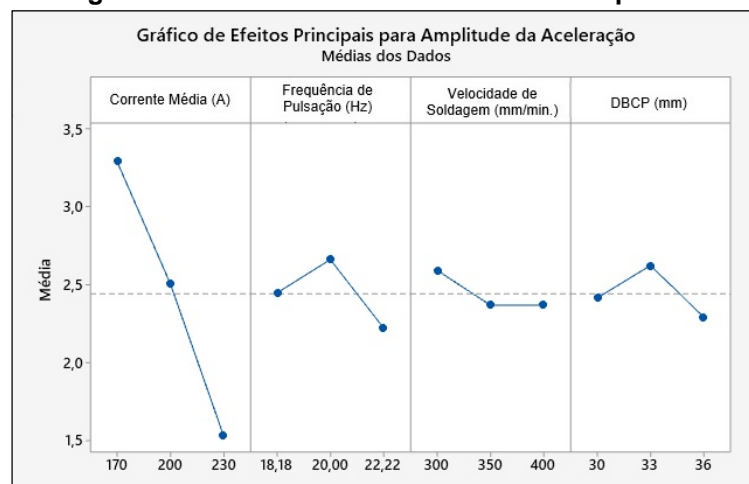
As mesmas faixas de resultados também aconteceram em pesquisas realizadas por Carvalho (2015, p.91) que realizou a aquisição dos sinais elétricos da tensão e corrente no processo de soldagem visando realizar sua otimização e Teixeira (2018, p.44) ao estudar a transferência da metal base utilizando filmagem em alta velocidade e aquisição dos sinais elétricos de corrente e tensão do arco para comparar com as imagens obtidas.

Figura 38: Efeitos das variáveis sobre a Potência.

Fonte: Autoria própria.

Observa-se através da Figura 39, que a média da amplitude da aceleração foi 2,442 m/s. E o comportamento aconteceu como esperado, ou seja, quanto maior a corrente média menor sua amplitude. As variáveis que afetaram com maior intensidade foram a corrente média ($P=0,000$) e a velocidade de soldagem ($P=0,000$). Já a frequência de pulsação e a DBCP, apresentou um valor de P superior a 0,05 consequentemente não afetou a variável de resposta.

Esses resultados também foram encontrados por Li *et al.* (2013, p.07) que utilizou um acelerômetro para detectar a posição e a velocidade da soldagem em um processo manual de soldagem de tubos e Resende (2017, p.102) visando determinar a estabilidade do arco e transferências metálicas, analisou sinais sonoros juntamente com os sinais elétricos de corrente e tensão através de redes neurais.

Figura 39: Efeitos das variáveis sobre a Amplitude.

Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÕES

Tendo em vista os objetivos propostos para essa pesquisa, que foi determinar a estabilidade da transferência metálica através dos sinais do arco elétrico gerado durante o processo de soldagem, conclui-se que:

- ✓ Por meio dos sinais da aceleração obtidos pelo acelerômetro foi possível concluir que para a corrente de 230 A o sistema apresentou uma menor oscilação, tendo seus valores entre 0,149 a 0,172 m/s², conseqüentemente uma menor aceleração RMS vindo a proporcionar uma melhor estabilidade do sistema;
- ✓ Aplicando a série de Fourier sobre os sinais de corrente, tensão e aceleração adquiridos durante o processo de soldagem, foi possível concluir que para todas as situações analisadas os três sinais sempre se encontravam em sincronismo apresentando a mesma frequência de oscilação;
- ✓ Utilizando a função findpeaks do matlab foi possível analisar a quantidades de picos em determinado intervalo de tempo, e verificar sua compatibilidade com os valores da frequência obtidos através da série de Fourier;
- ✓ Com base nos resultados obtidos através das tabelas de análise de variância verifica-se que dentre os parâmetros estipulados, a corrente média (A) afetou as variáveis de respostas [aceleração, potência e amplitude da aceleração]. A frequência de pulsação (Hz) afetou as variáveis de resposta [aceleração, frequência de pulsação obtida e quantidade de picos]. A velocidade de soldagem (mm/min) afetou as variáveis de respostas [aceleração, potência e amplitude da aceleração]. A Distância Bico de Contato Peça (DBCP) não afetou nenhuma das variáveis de respostas;
- ✓ Portanto, fundamentado na matriz de correlação entre as variáveis de respostas foi possível verificar que a variável aceleração apresenta uma correlação indireta e significativa com a [potência] e uma correlação direta e significativa com a [amplitude da aceleração]. A variável frequência de pulsação apresenta uma correlação direta e significativa com a [quantidade de picos]. A variável potência apresenta uma correlação indireta e significativa com a [amplitude da aceleração].

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base no trabalho realizado é possível observar que o assunto é muito amplo, possuindo uma diversidade de outras formas de ser explorado. Podemos citar algumas linhas de trabalhos futuros, tais como:

- ✓ Realizar a soldagem com corrente convencional utilizando os mesmos parâmetros de soldagem para fazer a comparação entre os valores obtidos em cada um dos ensaios;
- ✓ Mudar a inclinação da tocha de soldagem ou da mesa onde estão os corpos de prova;
- ✓ Aplicar outras metodologias de análise como, redes neurais ou fuzzy para confrontar com os resultados com este trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALVES, Sérvulo J. F. **Estudo dos fumos e gases gerados no processo de soldagem Gas Metal Arc Welding (GMAW) em duas empresas do segmento metal mecânico de Pernambuco.** 99f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE, 2016.
- ANDRADE, Augusto F. C. **Influência da corrente de pulso, tempo de pulso e diâmetro de gota sobre a estabilidade da transferência metálica no processo MIG-P.** 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2012.
- ARATA, Y.; INOUE, K.; FUTAMATA, M.; TOH. T. **Investigation on Welding Arc Sound: Vibration Analysis of Base Metal during Welding.** Osaka University Knowledge Archive: 1981.
- AROEIRA. C. **Measurement of Vibration.** Disponível em <<https://www.dmc.pt/en/medicao-de-vibracoes/>>. Acesso em 03 nov. 2021.
- AWS. **Welding Handbook - Welding Processes.** 9. ed. Miami: American Welding Society, 2004. 860p.
- AZEVEDO, Sarah C. **Avaliação de Aspectos Operacionais do Processo de Soldagem TIG-MIG/MAG.** 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Goiás, Catalão – GO, 2019.
- BARBEDO, Nancy D. D. **Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica.** 82f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG, 2011.
- BARRA, Sergio R. **Influência do Processo MIG/MAG Térmico sobre a Microestrutura e a Geometria da Zona Fundida.** 105f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2003.
- BENTO, Antônio V. **Como fazer uma revisão da literatura: Considerações teóricas e práticas.** Revista JA (Associação Acadêmica da Universidade da Madeira), n. 65, ano VII (p. 42-44). ISSN: 1647-8975. Mai. 2012.
- BRACARENSE, A. Q. **Processo de Soldagem por Arame Tubular FCAW,** Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010, 16p.
- CARVALHO, Leonardo A. **Metodologia de otimização do processo de soldagem P-GMAW em corrente alternada por análise de sinais tensão-corrente.** 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG, 2015.

CASTRO, Eliana C. J. **Avaliação de Soldas Produzidas por Arame Tubulares Desenvolvidos em laboratório do tipo básico com Adição de polímero com ingrediente do fluxo.** 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2015.

CAYO, Eber H. **Monitoramento, detecção e localização de defeitos na solda baseada no sensoriamento da pressão acústica do arco elétrico no processo GMAW-S.** 124f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos) - Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2008.

CORRÊA, Celso A. **Uma contribuição ao processo de soldagem de revestimento com arame tubular pulsado de um aço CA6NM aplicando o método de Taguchi.** 120f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2018.

CUNHA, T.V.; DUTRA, J.C.; SILVA, R.H.G.; JUNIOR, R.G. **Processo Plasma-MIG – Contribuição do Arco Plasma na Capacidade de Fusão do Arame.** In: XXXII CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem, Belo Horizonte - MG, 2006.

DUTRA, J.C. **Análise estatística de estabilidade de arco em soldagem MIG/MAG com transferência por curto-circuito.** In: Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem – ABS, 15, Anais. v.1, p.327-347. São Paulo: ABS, 1989.

DUTRA, J.C; MARQUES, C.; SILVA, R.H.G. **Consonâncias e Dissonâncias Interpretativas no Inter-relacionamento das Variáveis da Corrente Pulsada Aplicada à Soldagem com arame de Alumínio 4043.** Soldagem e Inspeção, v.17, n.3, p.201-209, 2012.

ESAB – Centro de conhecimento. **Processos de soldagem: arames tubulares.** Disponível em <https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_arames_tubulares.cfm>. Acesso em 03 fev. 2021.

FÁVERO, Luiz. P. **Análise de dados: modelagem multivariada para tomada de decisões.** 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. 646p.

FIELD, Andy. **Discovering Statistics Using SPSS.** 3. ed. London: Sage Publications Ltd, 2009. 469p.

GERDAU. **Aços para construção mecânica GERDAU – 1020.** Disponível em <https://www.gerdau.com/pt/productsservices/products/Document%20Gallery/Gerda_u%20-%201020.pdf>. Acesso em 03 fev. 2021.

GERDAU. **Guia de Soluções para Soldagem com Arames MIG-MAG.** 14p. Catálogo do fabricante. 2010.

GRAD, L.; GRUM, J.; POLAJNAR, I.; SLABE, J. M. **Feasibility study of acoustic signals for on-line monitoring in short circuit gas metal arc welding.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 44, Issue 5, p.555-561, April 2004.

GUIMARÃES, Jéssika B. **Estudo dos Parâmetros de Soldagem em um Revestimento de Aço Martensítico 410 NiMo pelo Processo FCAW Pulsado Utilizando Modelos de Regressão.** 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio – PR, 2020.

HAIR JÚNIOR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 688p.

HSU, Hwei P. **Teoria e problemas de sinais e sistemas.** 1. ed. Porto Alegre: Bookman (Coleção Schaum), 2004. 431p.

KIM, D.H.; CHUNG, C.M.; BAIK, S.H.; KIM, K.S; KIM, J.T. **Fast Fourier Transformer Analysis of Welding Penetration Depth using 2 kW CW Nd: YAG Laser Welding Machine.** Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, v.28, n.4, p.372-376, 2008.

JOHNSON, J.A et al. **Process control of GMAW: sensing of metal transfer mode.** Welding Journal, Miami, p.91s-99s, apr.1991.

LANCASTER, J. F. **The Physics of Welding.** 2 ed., The International Institute of Welding, Pergamon Press, Headington Hill Hall, Oxford, Inglaterra, 1986. 360p.

LI, X.; LU, Y.; ZHANG, Y. **Accelerometer-based position and speed sensing for manual pipe welding process.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 69, 705–713 (2013). <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5056-0>

LIMA, A.C.; FERRARESI, V. A. **Estudos dos modos de transferência metálica de um arame tubular autoprotetido com variação na distância bico de contato-peça.** Soldagem e Inspeção, v.11, n.3, p.164-172, 2006.

LOMAN, M.; NIZWAN, C.K.E.; YUSOF, N.M. **Defect Detection on Welding Joint using Acoustic Emission Technology.** International Conference on Innovations in Engineering and Technology (ICIET'2013), p.154-157, Bangkok (Thailand), 2013.

LOPERA, J.E.P.; RAMOS, E.G.; CARVALHO, G.C.; ALFARO, S.C.A. **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 Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, v.1, p.1-9. Caxias do Sul, RS. 2001.

MACHADO, Ivan G. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos.** 1. ed. Porto Alegre: Ed. do Autor, 1996. 477 p.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia.** 3.ed. ISBN 9788570417480. Belo Horizonte, Minas Gerais: UFMG, 2009. 362p.

MAZZAFERRO, J.A.E.; MACHADO, I.G. **Método de caracterização da estabilidade do arco elétrico utilizando frequências por FFT**. Soldagem e Inspeção, Suplemento Técnico, v.6, n.5, 2000, p.9-16, 2000.

MELO, Vinícius S. **Efeito do tipo corrente usada em soldagem GMAW na resistência ao riscamento de depósitos de Fe-Cr-C**. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba - PR, 2018.

MIRANDA, H. C. **Reconhecimento e Controle da Transferência Metálica no Processo MIG/MAG Pulsado**. 102f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2002.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V. **Introdução aos Processos de Soldagem**. 52p. (apostila) Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte - MG, 2012. Disponível em <<https://asm-treinamentos.com.br/downloads/soldador/arquivo84.pdf>>. Acesso em 22 ago. 2021.

MODENESI, Paulo J. **Introdução à Física do Arco elétrico**. 54p. (apostila) Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte - MG, 2001. Disponível em <<https://asm-treinamentos.com.br/downloads/soldador/arquivo85.pdf>>. Acesso em 21 ago. 2021.

MONTEIRO, Alberto C. **Estudo do comportamento dos aços ferramentas soldados em fadiga**. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Pará, Belém - PA, 2011.

MUÑOZ, J.J.C.; CARVALHO, G.C.; ALFARO, S.C.A. **Obtenção de parâmetros em soldagem GMAW –Pulsado, usando-se critérios de desenvolvimento de transferência metálica, aplicados na recuperação de Pás de turbinas**. ABCM Symposium Series in Mechatronics, v.6, p.1252-1262, 2014.

NIXON, J. H.; NORRISH, J. **Determination of Pulsed MIG Process Parameters**. Welding & Metal Fabrication, p. 4-7, April 1988.

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 e Inspeção. São Paulo, v.20, n.2, p.191-204, 2015.

NORRISH, J. **Advanced Welding Processes**. IOP, Bristol, 1992, 375p.

NYQUIST, H. (1924). **Certain Topics in Telegraph Transmission Theory. Classic Paper, American Telephone & Telegraph Co., New York, NY. Reimpresso pela Transactions of the A.I.E.E.**, p. 617-644, Feb. 1928, Proceedings of the IEEE, n.2, v.90, February 2002.

OPPENHEIM, A.V.; WILLISKY, A.S. **Sinais e sistemas**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2010. 568p.

PALANI, P. K.; MURUGAN, N. **Sensitivity analysis for process parameters in cladding of stainless steel by flux cored arc welding.** Journal of Manufacturing Processes, v. 8, n. 2, p. 90-100, 2006.

PEIXOTO, A.L.; SILVA, F.G.; BARBOZA FILHO, L.S; BRAGA, E.M. **Estudo da Estabilidade de Arco e Sanidade de Soldas FCAW -CW.** In: 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF, Caxias do Sul, RS, 9p., 2011.

PESSOA, Antônio R. P. **Soldagem em Chapas de Aços Inoxidáveis Superduplex UNS S32750 utilizando o processo Arame Tubular.** 271f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Matérias) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 2015.

PESTANA, M. H.; GAGEIRO, J. N. **Análise de dados para ciências sociais: a complementaridade do SPSS.** 4. ed. Lisboa: Sílabo, 2005. 1240p.

PROAKIS, J. G.; MANOLAKIS, D. G. **Digital Signal Processing.** 5 ed. New Jersey: Prentice Hall, 2016. 1084p.

RAMOS, E.G.; CARVALHO, G.C; ALFARO, S.C.A. **Análise da Oscilação da Poça de Solda em P-GMAW por Meio de Processamento de Imagens Obtidas por Perfilografia.** Soldagem e Inspeção, v.18, n.01, p.039-049, 2013.

RAO, Singiresu **Vibrações Mecânicas.** 4. ed. Sao Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. 438p.

RESENDE, Amadeu D. **Mapeamento paramétrico da soldagem GMAW com arames de aço inoxidável ferrítico e austenítico.** 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2007.

RODRIGUES, Lucilene O. **Análise e Otimização de Parâmetros na Soldagem com Arame Tubular.** 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG, 2005.

SARNI, Mírian I. J. **Estudo da soldagem GMAW convencional e pulsada de aço estrutural temperado e revenido utilizando eletrodo de alma metálica.** 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru - SP, 2011.

SILVA, Eduardo M. **Comparação de Características Operacionais no Processo com Eletrodo Tubular utilizando as Transferências por Curto- Circuito e Pulsado na Posição Vertical Descendente.** 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - MG, 2006.

SLANIA, J.; SLAZAK, B; FIDALI, M. **Application of Fast Fourier Transformer (FFT) in the analysis of the welding current instantaneous values waveforms during welding with a covered electrode.** Metallurgy and Materials, v.2, n.59, p.569-573, 2014.

SOUNDARARAJAN, V.; ATHARIFAR, H.; KOVACEVIC, R. **Monitoring and processing the acoustic emission signals from the friction-stir-welding process.** Journal of Engineering Manufacture, Part B, v.220, p.1673-1685, 2006.

SOUZA, Claudio I; FERRARESI, Valtair A. **Análise comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW com transferência metálica por curto-circuito na posição horizontal.** Soldagem & Inspeção – Artigo Técnico. Vol. 18, nº03. São Paulo, p.268-280, 2013.

STARLING, C.M.D.; MODENESI, P.J. **Avaliação da velocidade de fusão do arame na soldagem FCAW com eletrodo negativo.** Soldagem e Inspeção, Vol.10, n.01, p.168-178, 2005.

STEIN, E.M.; SHAKARCHI. I. **Fourier Analysis an Introduction.** Princeton University Press, 2003. 311p.

SUBAN, M.; TUSEK, J. **Methods for the Determination of Arc Stability.** Journal of Materials Processing Technology. p.430-437. 2003.

TEIXEIRA, Gustavo S. **Análise de influência dos parâmetros de soldagem só a geometria do cordão de solda depositado no processo de soldagem MIG_MAG em tandem.** 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2011.

TEIXEIRA, Gustavo S. **Estudo da transferência do metal de adição no processo gmaw por filmagem de alta velocidade e aquisição de sinais elétricos.** 123f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2018.

WANG, W.; LIU, S.; JONES, J.E. **Flux Cored Arc Welding: Arc Signals, Processing and Metal Transfer Characterization.** Welding Journal, Welding Research Supplement, v.74, n.11, p.369s-377s., 1995.

WANG, X.; LI, Y.; MENG, G. **Monitoring of resistance spot weld quality using electrode vibration signals.** Measurement Science and Technology, v. 22, n.4, p.11., 2011.

ZANINI, Junior B. **Investigação e Prospecções para o Processo de Soldagem Híbrida Plasma-Mig Serial.** 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2020.