

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA MECÂNICA – DAMEC
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

JÉSSIKA BATISTA GUIMARÃES

**ANÁLISE DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM PELO PROCESSO
CONVENCIONAL COM ARAME TUBULAR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2016

JÉSSIKA BATISTA GUIMARÃES

**ANÁLISE DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM PELO PROCESSO
CONVENCIONAL COM ARAME TUBULAR**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Superior de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico da Mecânica – DAMEC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Sartori
Moreno

Coorientador: Prof. Me. Celso Alves Corrêa

CORNÉLIO PROCÓPIO

2016



Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Campus Cornélio Procópio

Departamento Acadêmico de Mecânica

Curso de Engenharia Mecânica

FOLHA DE APROVAÇÃO

Jéssika Batista Guimarães

Análise de parâmetros de soldagem pelo processo convencional com arame tubular

Trabalho de conclusão de curso apresentado às _____ do dia _____ como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). João Roberto Sartori Moreno - (Orientador)

Prof(a). Me(a). Celso Alves Corrêa – Vice - Presidente (Coorientador)

Prof(a). Dr(a). Amauri Bravo Fereda - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Celso Naves de Souza - (Membro)

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser concluído sem a ajuda de diversas pessoas que durante todo esse tempo de preparação sempre estiveram me apoiando, portanto deixo aqui uma singela homenagem:

Em primeiro lugar e acima de tudo a Deus, pois Ele é a minha fortaleza.

Ao meu orientador João Roberto Sartori Moreno e coorientador Celso Aves Corrêa que sempre estavam prontos para me atender e muito mais do que isso, ficam como um exemplo de profissionais a serem seguidos.

Aos professores Amauri Farneda e Celso Naves por aceitarem compor minha banca avaliadora e contribuírem com toda sua experiência para aprimoramento deste trabalho.

A toda minha família, mas em especial à minha mãe, pois ela é a razão da minha vida e sem o esforço dela e apoio eu jamais chegaria e conquistaria todas as vitórias que possuo hoje.

A meu marido, que sempre foi compreensivo e me deu força para seguir em frente.

A todos os professores e amigos que de forma direta ou indireta me ajudaram e me incentivaram a jamais desanimar, em especial aos amigos Luís Guilherme Marin, Leonardo Marçon, Ana Carolina Pitoli, Bruna Padilha e Paola Vieira.

E a universidade que me proporcionou um espaço para me tornar a profissional que me consagro no presente.

“ A persistência é o caminho do êxito.”

(Charles Chaplin)

RESUMO

GUIMARÃES, Jéssika Batista. *Análise de parâmetros de soldagem pelo processo convencional com arame tubular*. 2016. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Programa de Graduação de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

O presente trabalho consiste na análise da soldagem de revestimento aplicada pelo processo de arame tubular com proteção gasosa em posição plana, utilizando uma fonte de corrente convencional. O metal de base adotado foi o aço SAE 1020 e como metal de adição um arame tubular de 1,2 milímetros de diâmetro do aço inoxidável martensítico 410 (CA6MN). Para o planejamento experimental e seleção da quantidade de ensaios foi empregado o método Taguchi, sendo as variáveis de influência a corrente média, a distância bico contato peça e a velocidade de soldagem. Os sinais de corrente e tensão foram capturados simultaneamente ao processo de soldagem através de placa de aquisição. Como resultados do estudo destes valores temos as características econômicas e estabilidade do arco para cada ensaio. Para análise dos valores finais encontrados foi aplicada a Análise de Variância para cada variável e também no efeito combinado entre elas. Diante disso, foi possível comprovar que o método Taguchi é eficiente para minimizar quantidade de ensaios. No maior nível de corrente obteve-se o melhor desempenho das características econômicas comprovada por parâmetros como a taxa de fusão, taxa de deposição e rendimento. A velocidade de soldagem foi o fator de maior influência no rendimento do processo. Ainda a partir de programação no software Matlab[®] foi possível trabalhar com os valores de corrente e tensão aquisitados e verificar as condições de melhor estabilidade do arco. Os cálculos foram baseados na facilidade de transferência metálica, desvios padrão e variância dos picos de tensão em um intervalo de tempo.

Palavras-chave: FCAW Convencional, Estabilidade do arco, Características Econômicas.

ABSTRACT

GUIMARÃES, Jéssika Batista. *Analysis welding parameters by the conventional process with cored wire*. 2016. 53 f. Monograph - Mechanical Engineering Graduate Program, Federal Technological University of Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

This monograph consists of making the analysis a coating applied by welding cored wire process with shielding gas in flat position using a conventional source of current. The base metal used was the SAE 1020 steel, and as filler metal was used cored wire with diameter 1.2 mm of martensitic stainless steel 410 (CA6MN). For the experimental design and selection of the quantity of tests was applicated the Taguchi method, since the variables of influences represented by the average current, the distance between the tip contact piece and the welding speed. The signals of current and voltage were captured simultaneously to the welding process by a board of purchase. As the results of study of these values, it was obtained the economic characteristics and arc stability for each test. For the analysis of the final values found in the process was applied the Variance Analysis to each variable and also the combined effect between them. Thus, it was possible to prove that the Taguchi method is effective to minimize the quantity of tests. In the greatest current was obtained the best performance of the economic features proven by parameters such as the melting rate, deposition rate and yield. The welding speed was the most influential factor in the processing yield. Still from programming in Matlab® software it was possible to work with the current values and collected tension and verify the conditions of better stability of the arc. The calculations were based on ease of metal transfer, standard deviation and variance of the voltage peaks in a time interval.

Keywords: Conventional FCAW, Arc Stability, Economic Characteristics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Perfil geométrico do cordão de solda: a) soldagem de penetração (aplicação convencional); b) soldagem de revestimento.....	17
Figura 2 - Soldagem com arame tubular autoprotégido.	19
Figura 3 – Soldagem com arame tubular com gás de proteção.	19
Figura 4 – Formato dos Arames Tubulares.	20
Figura 5 - Formas dos arames tubulares.	20
Figura 6 - Modos Fundamentais de Transferência Metálica, proposto pelo IIV.	22
Figura 7 - Condições de corrente e tensão para diferentes formas de transferência metálica	27
Figura 8 – Distribuição e Localização dos Equipamentos Utilizados.....	30
Figura 9 – Distribuição e Localização do Sistema de Aquisição.	30
Figura 10 – Dispositivo de posicionamento dos corpos de prova.....	31
Figura 11 – Taxa de fusão obtida pelo processo de soldagem.	40
Figura 12 – Taxa de deposição obtida pelo processo de soldagem.....	40
Figura 13 – Rendimento obtido pelo processo de soldagem.....	40
Figura 14 - Picos de corrente e tensão. (200 A – 300 mm/min).	43
Figura 15 - Picos de corrente e tensão. (200 A – 350 mm/min).	43
Figura 16 - Picos de corrente e tensão. (230 A – 300 mm/min).	44
Figura 17 - Picos de corrente e tensão. (230 A – 350 mm/min)	44
Figura 18 - Resultado da média dos picos de tensão em cada ensaio.	46
Figura 19 - Resultado do desvio padrão dos picos de tensão em cada ensaio.	46
Figura 20 - Resultado da variância dos picos de tensão em cada ensaio.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equipamentos utilizados na bancada de ensaios.	29
Tabela 2 - Demais instrumentos utilizados.....	31
Tabela 3 - Parâmetros e níveis mantidos constantes durante a soldagem.	33
Tabela 4 - Valores dos ensaios com corrente convencional.	33
Tabela 5 - Resultados das características econômicas.	39
Tabela 6 - Resultados da ANOVA para as características econômicas.	39
Tabela 7 - Resultados da facilidade de transferência metálica em cada ensaio.	45
Tabela 8 - Resultados do desvio padrão e variância em cada ensaio.	45

LISTA DE SIGLAS

ANOVA – Analysis of Variance
ASME – American Society Materials Engineering
AWS – American Welding Society
D – Diluição
FCAW – Flux Cored Arc Welding
 F_{cc} - Facilidade de ocorrência de curto-circuito
 F_{tm} - Facilidade de transferência da gota no curto-circuito
i – quantidade de picos
IIW – Instituto Internacional de Soldagem
L - Comprimento do metal de adição consumido
MEAN – Média
 M_f - Massa final da junta depois da soldagem
 M_i - Massa inicial da junta antes da soldagem
P – Penetração
R – Reforço
 R_{cc} – Regularidade de ocorrência de curto-circuito
Re – Rendimento
 R_{tm} – Regularidade de transferência da gota no curto-circuito
SAE – Society of Automotive Engineers
STD – Desvio padrão
T – Período médio de transferência
 t_{cc} – Tempo médio de curto-circuito
TD – Taxa de Deposição
TF – Taxa de Fusão
 t_s - Tempo de soldagem
VAR - Variância

LISTA DE SÍMBOLOS

α = nível de significância

ρ = densidade linear do arame

σ = desvio padrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS DO TRABALHO.....	12
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	SOLDAGEM	14
2.1.1	Soldagem de Revestimento.....	15
2.1.2	Soldagem com Arame Tubular	17
2.2	MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA	21
2.3	PARÂMETROS DE SOLDAGEM	23
2.4	CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS NA SOLDAGEM.....	24
2.5	ESTABILIDADE DO ARCO.....	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1	MATERIAIS.....	28
3.2	EQUIPAMENTOS.....	28
3.3	METODOLOGIA.....	32
3.3.1	Parâmetros de soldagem	32
3.3.2	Corpos de Prova	34
3.3.3	Características econômicas	35
3.3.4	Estabilidade do Arco Elétrico	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1	CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS	38
4.2	ESTABILIDADE DO ARCO.....	42
5	CONCLUSÕES	48
5.1	CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS	48
5.2	ESTABILIDADE DO ARCO.....	48
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	50
7	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, em escala mundial, a soldagem com arame tubular (FCAW – Flux Cored Arc Welding) tem apresentado o maior crescimento em termos de utilização, isso se deu graças às características especiais que esse processo pode resultar. Dentre as maiores vantagens alcançadas na utilização deste processo, pode-se destacar a obtenção de soldas de alta qualidade, arco estável, menor vazão de gás e baixo nível de respingos.

As altas taxas de deposição e o desenvolvimento de novos consumíveis têm levado empresas a migrar para este processo. Portanto, os arames tubulares, foram desenvolvidos no intuito de aumentar a competitividade e reduzir custos, que são os principais objetivos em um ambiente industrial.

Desta maneira, este projeto busca levantar as características operacionais do processo e as características geométricas da solda. Com isso, pretende-se desenvolver conhecimentos e análises para melhor compreender as limitações e vantagens que podem ser obtidas no emprego do método de soldagem por arame tubular, encontrando as melhores combinações entre os parâmetros de usinagem e incentivando um interesse cada vez maior das indústrias pela sua utilização.

1.1 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS DO TRABALHO

Um processo de soldagem pode se tornar vantajoso ou não em relação aos seus resultados obtidos, de acordo com a combinação de parâmetros adotados. Leva-se em conta o tipo de processo, o eletrodo utilizado, metal de base adotado e demais fatores que possam interferir nos resultados almejados.

Neste contexto, o presente trabalho busca estudar parâmetros na soldagem de revestimento com corrente convencional utilizando arame tubular, a partir da aquisição e análise de dados de corrente e tensão. Os resultados

das variáveis de resposta de acordo com as variáveis de influência, foram analisados através de Análise de Variância com o software MINITAB.

Portanto, os objetivos deste trabalho são:

- Determinar características econômicas da soldagem (taxa de fusão, taxa de deposição e rendimento);
- Verificar a estabilidade do arco elétrico.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se dividido nos seguintes capítulos:

- Capítulo 1: introdução ao tema e objetivos buscados com a realização do trabalho;
- Capítulo 2: uma revisão bibliográfica dos pontos-chaves que permeiam este estudo, buscando esclarecer conceitos e facilitar a obtenção dos resultados;
- Capítulo 3: detalhamento dos materiais e equipamentos utilizados, bem como a metodologia empregada em cada etapa, além de todas as análises e estudos estatísticos necessários.
- Capítulo 4: apresentação de todos os dados coletados e respostas após as análises, bem como discussões quanto aos resultados.
- Capítulo 5: trata das conclusões obtidas avaliando e comparando tudo o que foi encontrado na bibliografia, com os resultados alcançados nos ensaios e com os objetivos estipulados.
- Capítulo 6: sugestões para trabalhos futuros.
- Capítulo 7: apresentação das referências buscadas para a revisão bibliográfica e formular a proposta de trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Muitas definições se fazem necessárias para a compreensão do trabalho como um todo. Realizar uma busca na literatura e relembrar assuntos abordados durante o curso de maneira mais profunda é um interessante caminho para aplicação dos conceitos.

A revisão bibliográfica trata justamente disto, da explanação de alguns tópicos mais relevantes e pertinentes ao trabalho realizado.

Este capítulo será reservado para uma revisão da literatura referente aos tópicos relacionados à execução do trabalho. Dentre eles, a descrição de conceitos e aplicações da soldagem, soldagem de revestimento, soldagem com arame tubular, características econômicas, parâmetros de soldagem, estabilidade do arco, modos de transferência metálica, análise de variância e demais temas.

Tais pesquisas foram realizadas durante todo decorrer do trabalho e efetuadas em livros, artigos, meio eletrônico, apostilas e vídeos.

2.1 SOLDAGEM

Antigamente, a soldagem era definida como “a junção de metais por fusão”, porém com o avanço da tecnologia, descobriu-se que não é necessário que sempre 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”. (QUITES, 2011)

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.

Dentre as inúmeras vantagens em se empregar um processo de soldagem, podemos citar: a obtenção de juntas de integridade e eficiência elevadas; a grande quantidade de tipos de processos; aplicação em diferentes tipos de materiais; possibilidade de operar manual ou automático; oportunidade de ser portátil e dentre outras. Porém, todo processo também possui algumas características desfavoráveis, onde se destaca: a impossibilidade de desmontagem; pode ocasionar mudança na estrutura e partes da peça; pode causar tensões e distorções; necessitam de certa habilidade e compreensão do processo por parte dos operadores e demais aspectos. (PORTAL METÁLICA, 2015)

Como já foi ressaltado, há uma diversidade de processos que podem ser trabalhados, como a soldagem por eletrodo-escória, por arco submerso, eletrodo revestido, MIG/MAG, plasma, onde, dentro de suas particularidades cada um gera resultados satisfatórios e atendem as necessidades de determinada aplicação específica. Assim, o grande segredo e o principal para se obter o diferencial e alcançar as melhores respostas, é saber selecionar qual método adotar.

2.1.1 Soldagem de Revestimento

Um dos maiores problemas encontrados em um setor industrial é a perda de peças ou equipamentos, o que gera um aumento nos custos de determinado processo. O desgaste é um destes principais fatores que geram a ocorrência deste alto índice de percas, afinal todo material, peça ou equipamento sofre desgaste, porém existem limites que indicam até quando

você poderá utilizar o equipamento, geralmente determinados pelo tipo de esforço que aquele determinado componente deverá suportar.

Com o avanço tecnológico, novos métodos na tentativa de diminuir os efeitos causados por este fenômeno vêm sendo desenvolvidos, dentre eles temos o revestimento, sendo um processo que pode ser realizado de diversas maneiras, porém para este trabalho será dado enfoque apenas no revestimento obtido através da soldagem.

Na seleção das características que permearam a soldagem deve-se ter muito cuidado e saber realizar um balanço dos custos e benefícios agregados, afinal pode acontecer de nem sempre a realização de um revestimento ser a opção mais viável economicamente falando.

Alguns destes cuidados importantes quando se opta pelo revestimento realizado à partir da soldagem é em relação à geometria da peça, custo do procedimento, cuidado com o desenvolvimento de trincas ou distorções e o nível de qualidade exigida. No qual, este índice da qualidade será obtido dependendo do tipo de material de adição utilizado, da forma de aplicação e habilidade do soldador. (GOMES, 2010)

Algumas finalidades do revestimento pelo método da soldagem que podem ser citados: melhorar a eficiência do equipamento; reduzir o consumo de potência; reduzir custos com aquisição de novas máquinas; recuperação de peças sem necessidade de substituição; aumento da vida útil de instalações, peças e ferramentas; diminuição do tempo de parada dos equipamentos e melhores soluções em projetos de máquinas. (ZIEDAS e TATINI, 1997)

A soldagem de revestimento, portanto, é definida pela AWS como a deposição de um metal de adição em camada sobre a superfície de outro metal objetivando obter propriedades ou dimensões desejadas. A geometria do cordão de solda obtido pelo processo de soldagem de revestimento é um dos principais fatores que diferencia este método dos demais convencionais. Com o perfil obtido verifica-se a possibilidade de recobrir grandes áreas com menores números de passes, assim, conseqüentemente contribuindo para economia de material e tempo. Portanto, nota-se que um dos maiores desafios deste método consiste em ajustar os parâmetros do processo para que possibilite que o material depositado adquira a geometria desejada. (GOMES, 2010)

Na Fig. 1 abaixo destacada pelo autor GOMES (2010), apresenta-se a geometria dos cordões em uma aplicação convencional e pelo processo de revestimento.

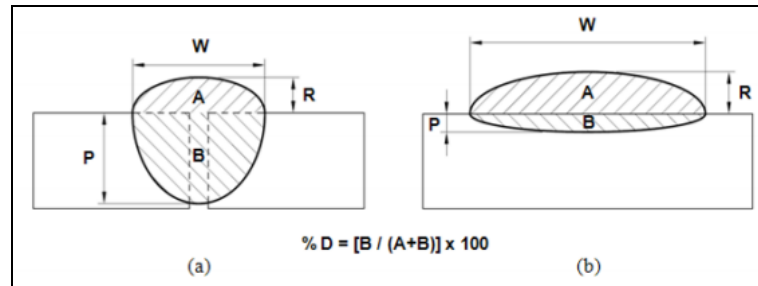


Figura 1 - Perfil geométrico do cordão de solda: a) soldagem de penetração (aplicação convencional); b) soldagem de revestimento. Fonte: (GOMES, 2010, p. 10)

A partir da Figura 1, é possível observar que em aplicações convencionais, como a soldagem de penetração representada, o objetivo é alcançar uma grande área de Penetração (P) e um Reforço (R) pequeno, porém na soldagem de revestimento, acontece justamente o inverso, a busca é pelo reforço maior possível (região A) e pouca penetração (região B), e ainda temos o cálculo da diluição (D).

2.1.2 Soldagem com Arame Tubular

Os arames tubulares foram desenvolvidos no início da década de 50 e começaram a ser comercializados em 1957. Já nas décadas de 60 e 70 houve um crescimento significativo deste processo nos Estados Unidos, e posteriormente na década de 80 no Japão. Entretanto, em 1990 começa-se a sua produção e venda no Brasil. (FORTES, 2004)

Este método de soldagem por arame tubular acaba ganhando espaço devido os importantes fatores que podem ser obtidos por meio dele. Ele vem para combinar as melhores características da soldagem por arco submerso e da soldagem empregando dióxido de carbono (CO₂) como gás de proteção.

Essa combinação da proteção externa proporcionada pelo CO₂ com o fluxo do núcleo do arame tubular produz um arco estável com baixo nível de respingos e uma solda de alta qualidade. (FORTES, 2004)

Nos primeiros anos, os arames eram produzidos com grandes diâmetros e havia certa limitação quanto a sua utilização, afinal podiam ser empregados apenas nas posições plana e horizontal para peças pesadas. Porém com a evolução e aprimoramento, por volta da década de 70, eles passam a possuir diâmetros menores, constituídos de fluxos não-metálicos e possibilidade de soldagem em todas as posições, assim, aumentando o seu campo de aplicação. (FORTES, 2004)

Este método de soldagem possui diversas definições e conceitos que procuram detalhar como ocorre o processo e o que é necessário para que ele ocorra. Segundo MODENESI et. al (2010), descrevemos o processo como:

“ A soldagem a arco com arame tubular (Flux-Cored Arc Welding - FCAW) é um processo que produz a coalescência de metais pelo aquecimento destes com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo tubular, contínuo, consumível e a peça de trabalho. A proteção do arco e do cordão de solda é feita por um fluxo de soldagem contido dentro do eletrodo, que pode ser suplementada por um fluxo de gás fornecido por uma fonte externa.” (MODENESI et. al, 2010, pg 255)

A soldagem ainda possui duas variações. Um método quando apenas o fluxo contido no eletrodo gera toda a proteção necessária, chamado então arame autoprotégido, ilustrado pela Figura 2. E outro, apresentado na Figura 3 quando é necessária uma complementação da proteção com uma nuvem de gás externa, geralmente de dióxido de carbono (CO₂).

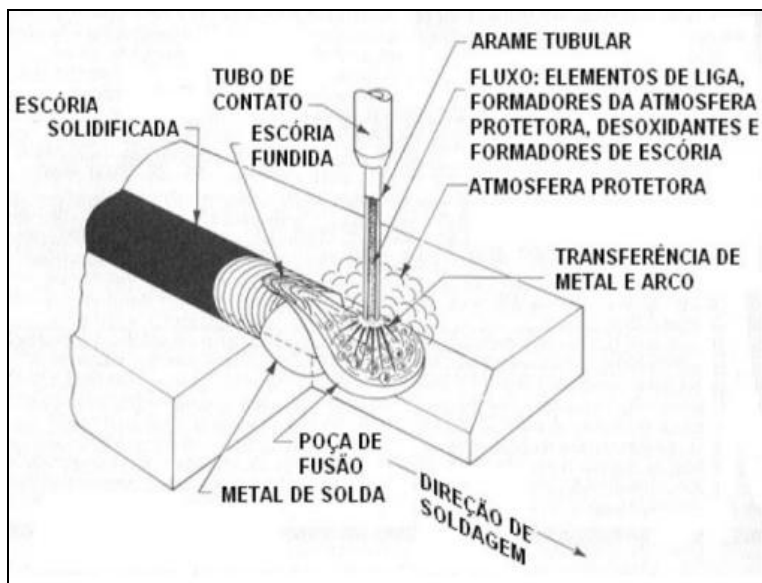


Figura 2 - Soldagem com arame tubular autoprotetido.
Fonte: (GOMES, 2010, p. 16)

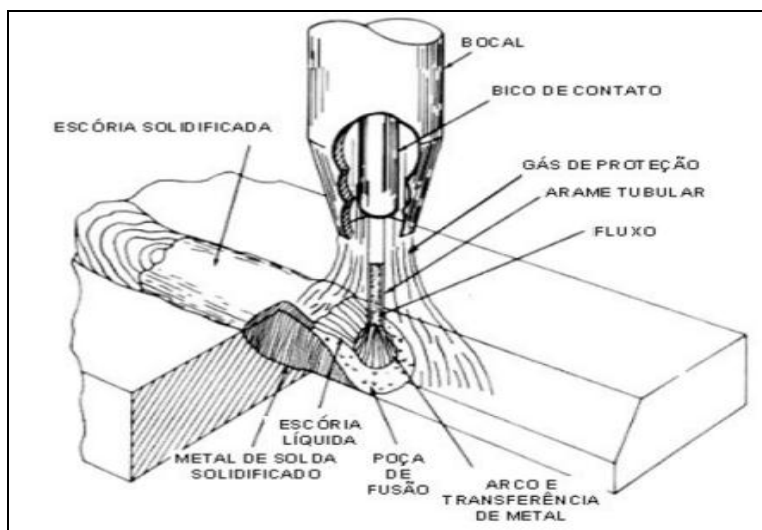


Figura 3 – Soldagem com arame tubular com gás de proteção.
Fonte: (GOMES, 2010, p. 16)

Normalmente, o processo ocorre de forma semiautomática. A Figura 4 indica o fluxo de soldagem, representado por um pó metálico localizado no interior do eletrodo, que possui a forma de um arame, no qual contém minerais, ferros-liga, e materiais que produzem gases de proteção, desoxidantes e formadores de escória. Além destas funções, os fluxos ainda protegem a poça de fusão e o arco voltaico da contaminação do ar, refinam o metal de solda e adicionam elementos de liga à solda. (GOMES, 2010; ZIEDAS e TATINI, 1997)

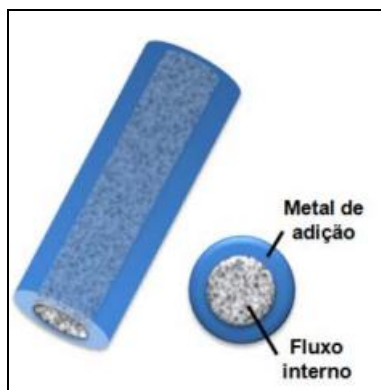


Figura 4 – Formato dos Arames Tubulares.
Fonte: (GOMES, 2010, p. 15)

Entretanto, os arames tubulares apresentam diferentes formatos internos que mudam de acordo com o diâmetro empregado. Segundo o Instituto Internacional de Soldagem (IIW), os formatos podem ser descritos como: sem costura, de topo, sobreposto, dobra simples, dobra múltipla e dobra dupla. A Figura 5 representa as suas formas: (MODENESI et. al, 2010)

Tipo Nº.	Seção	Símbolo	Descrição
1			Sem costura
2			De topo
3			Sobreposto
4			Dobra simples
5			Dobra múltipla
6			Dobra dupla

Figura 5 - Formas dos arames tubulares.
Fonte: (MODENESI et. al, 2007)

De acordo com GOMES (2010), entre as principais vantagens e limitações obtidas no emprego da soldagem com arame tubular, temos:

- Altas taxas de deposição;
- Eletrodo com desperdícios mínimos;
- Soldagem em todas as posições;
- Flexibilidade;
- Solda de alta qualidade;
- Poça de fusão com excelente controle;
- Processo limitado na utilização de metais ferrosos e ligas de níquel;
- Custo mais elevado com equipamentos e eletrodos;
- Exige a operação de remoção de escória;
- Geração de uma maior quantidade de fumos.

O campo de aplicação para o emprego da soldagem com arame tubular abrange: fabricação de estruturas de aço carbono, de baixa liga e de aço inoxidável; soldagem em fabricação, manutenção e montagem no campo; soldagem de partes de veículos; em indústrias navais e nucleares; construção de plataformas marítimas. (MODENESI et. al, 2010)

2.2 MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA

O tipo de transferência metálica que acontece em um processo de soldagem é definido pela forma com que o metal fundido se transfere da ponta do metal de adição (eletrodo) para a poça de fusão. O modo com que isso ocorre pode interferir em aspectos operacionais do processo de soldagem, como o nível de respingos, a estabilidade do arco, o formato do cordão e o desempenho da solda. (WINK, 2014)

Atualmente o IIW, vem propondo atualizações e revisões na forma de classificação e distinção dos tipos de transferência metálica, assim adicionando novas variantes com o desenvolvimento tecnológico. Com isso, fica proposto o conceito “Modos Fundamentais de Transferência Metálica”, ou seja, um

conjunto de tipos de transferência claramente definidos e distintos, apresentado na Figura 6. (SOUZA, 2011)

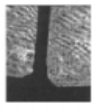
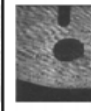
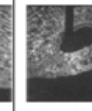
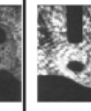
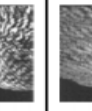
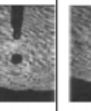
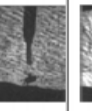

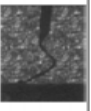
Proposta de Classificação Pelo IIW	Fundamental		A		B		C	D		E
	Curto - Circuito		Globular		Pulsada Projetada		Goticular (Spray)		Rota- cional	
	An	Ac	B1	B2			D1	D2		
Variante	Curto- Circuito	Curto- Circuito Controlado	Globular em Gotas	Globular repelida	Pulsada	Goticular	Elongamento (streaming)	Explosiva	Rotacional	
Tipo Fundamental	Natural	Controlado	Natural	Natural	Controlado	Natural	Natural	Natural	Natural	
Visualização										

Figura 6 - Modos Fundamentais de Transferência Metálica, proposto pelo IIW.
Fonte: (SOUZA, 2011, p. 10)

Algumas variáveis também podem definir qual será a forma de transferência que será obtido, como exemplo, a partir dos parâmetros elétricos do arco adotado (tipo e valor da corrente, tensão e polaridade), pelo diâmetro e composição do metal de adição, pelo tipo e composição da proteção externa e entre outros. (STARLING; MODENESI, 2005)

Existem alguns métodos que podem ser aplicados para verificar qual o tipo de transferência metálica em determinada operação de soldagem. Dentre elas, temos três categorias em que podem ser divididas: (STARLING; MODENESI, 2005)

- Métodos mecânicos: se baseiam na coleta de algumas gotas individuais do metal de adição com o auxílio de algum artifício.
- Métodos de cinematografia (shadowgrafia): consiste na formação de sombras projetadas de vários elementos diretamente sobre a lente de uma câmera filmadora ou em um filme fotográfico.
- Métodos indiretos (medição de efeitos secundários).

Na transferência por curto-circuito, acontece quando a velocidade de alimentação excede a velocidade de fusão do arame. Neste caso, as gotas

tocam a poça de fusão antes de se soltar, ocasionando uma extinção do arco e a transferência da gota acontecendo por tensão superficial. A poça de fusão formada é relativamente pequena, se solidifica rapidamente, e indicada à soldagem de seções finas e em todas as posições. (SOUZA, 2010)

A transferência globular, porém, já é caracterizada pela ausência destes curtos-circuitos e pelo fato de o tamanho da gota ser bem maior do que o diâmetro do arame antes do destacamento. Este modo é limitado a aplicação em posição plana, devido a instabilidade e excesso de geração de respingos. (SOUZA, 2010)

Com a transferência pulsada temos em destaque a maior estabilidade do arco. Obtida por fontes modernas, onde se impõe uma forma especial à onda de corrente, caracterizadas por pulsos periódicos de alta corrente. Este tipo de transferência utiliza maior quantidade de parâmetros a serem ajustados, conseqüentemente tornando a operação mais complexa e necessidade de equipamentos especiais. (SILVA e SCOTTI, 2002)

Na transferência goticular podemos encontrar altas densidades de corrente, com isso, altas temperaturas e penetração. Este modo é caracterizado por pequenas gotas uniformes e de maneira sequencial, com alta frequência desde o arame até a peça soldada. (LOPERA et. al, 2012)

E já com a transferência rotacional verificamos que não acontece mais de forma axial e sim, dependente mais fortemente do comprimento do eletrodo do que da corrente de transição, tendenciando a aproximação desta quando o comprimento é aumento.

2.3 PARÂMETROS DE SOLDAGEM

Muitas variáveis influenciam no desempenho de um processo. Reconhecer a influência delas durante o processo de soldagem auxilia na melhor utilização e desempenho do método.

As variáveis de soldagem podem ser divididas em quatro grupos básicos: (MOREIRA, 2008)

- Variáveis pré-determinadas: seleção do metal de base, escolha do metal para realizar a solda.
- Variáveis de fundo: qual o processo de soldagem, equipamento, projeto da junta, técnica de solda, forma e diâmetro do eletrodo, fluxo, tipo de gás, etc.
- Variáveis primárias: tipo e intensidade da corrente, tensão, velocidade de soldagem.
- Variáveis secundárias: comprimento do eletrodo, em relação à peça qual a posição da pistola;

O cuidado na seleção destes parâmetros conseqüentemente gera a obtenção dos melhores resultados. Optar pelas variáveis pensando no tipo de aplicação desejada é dar condições a alcançar os objetivos estipulados.

2.4 CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS NA SOLDAGEM

Vários fatores podem influenciar nas características de um processo de soldagem. Dentre eles, podemos destacar a intensidade da corrente, comprimento e diâmetro do eletrodo, tipo e quantidade do gás de proteção liberado, entre outros. (GOMES, 2006)

Uma dessas características que podem ser afetadas são os aspectos econômicos, podendo ser mensurados através da taxa de fusão, taxa de deposição e rendimento.

A taxa de fusão (TF) ou consumo é a quantidade de eletrodo fundido por unidade de tempo. Já a taxa de deposição (TD) é a quantidade em massa de eletrodo depositado por unidade de tempo. E por fim, o rendimento (Re) é representado pela relação entre taxa de deposição e taxa de fusão. (FILHO, 2003)

$$TD = 3,6 \frac{(M_f - M_i)}{t_s} \quad (\text{Kg/h}) \quad (\text{Equação 01})$$

Onde:

- M_f é a massa final da junta depois da soldagem (g);
- M_i é a massa inicial da junta antes da soldagem (g);
- t_s é o tempo de soldagem (s).

$$TF = 3,6 \frac{(\rho \cdot L)}{t_s} \quad (\text{Kg/h}) \quad (\text{Equação 02})$$

Onde:

- ρ é a densidade linear do arame (g/m);
- L é o comprimento do metal de adição consumido (m);
- t_s é o tempo de soldagem (s).

$$Re = \left(\frac{TD}{TF} \right) \times 100 \quad (\%) \quad (\text{Equação 03})$$

Um dos indícios de uma ineficiência em um processo de soldagem com eletrodo tubular é a presença de respingos durante a formação e transferência das gotas. Alguns dos fatores que podem conseqüentemente gerar esse fenômeno, são: (GOMES, 2006)

- Movimento dinâmico dos gases, causando explosões na gota e/ou na poça de fusão;
- Rompimento da ponte metálica entre o eletrodo e o metal de base durante a transferência;
- A desintegração das gotas grandes;
- O impacto do arco sobre a poça de fusão no momento da reabertura do arco;
- O impacto da gota sobre a poça de fusão.

Por tanto, um ajuste médio efetuado nos valores das variáveis que influenciam o processo de soldagem, é o mais aconselhável para se obter um processo mais econômicos e estável.

2.5 ESTABILIDADE DO ARCO

A estabilidade do arco elétrico é um requisito básico para um bom desempenho da operação de soldagem e afeta, diretamente, a qualidade final do metal depositado, a taxa de fusão, a taxa de deposição, o rendimento, a geometria da solda e as propriedades mecânicas. Um arco estável deve possuir uma transferência de metal e uma transferência de carga elétrica fácil e uniforme, além do comprimento constante e sem respingos.

Com o intuito de se facilitar um processo de soldagem e, por consequência, estimar a qualidade desta solda, é que muitos estudos vêm se desenvolvendo buscando quantificar os fatores que influem na estabilidade do processo.

Segundo Nogueira (2015), 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.

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 menores valores indica 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, e dentre outros. (NOGUEIRA, 2015)

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 ocorrência deste fenômeno é que para elevadas tensões de arco, ou seja, 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 o caráter explosivo, onde o arco atinge um comprimento bastante longo após cada curto-circuito, no qual demora para ocorrência de uma nova aproximação. (NOGUEIRA, 2015)

O mapa de transferência metálica também pode ser uma forma de se avaliar as regiões de estabilidade, analisando em função do par de valores tensão e corrente, ou velocidade de arame e tensão do arco, ou da combinação de demais parâmetros. A Figura 7 apresenta um destes mapas (WINK, 2014):

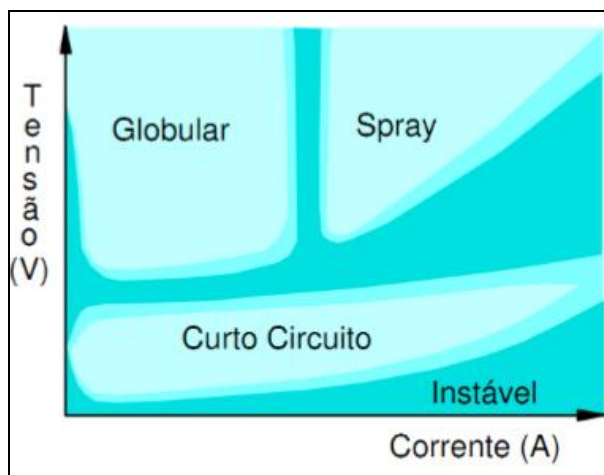


Figura 7 - Condições de corrente e tensão para diferentes formas de transferência metálica. Fonte: (WINK, 2014, p. 22)

De forma clara, é possível observar na Figura 7 as regiões bem distintas quanto ao tipo de transferência metálica que ocorre de acordo com a variação dos parâmetros, e a partir da diferença de cores as regiões de estabilidade, sendo as mais claras onde há maiores condições de arco estável e as mais escuras aquelas menos favoráveis à estabilidade do processo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo teremos a apresentação de todos os materiais e equipamentos que foram necessários à realização dos experimentos para a obtenção dos resultados almejados. Também, está detalhada a metodologia empregada e etapas executadas para atingir os objetivos estipulados.

3.1 MATERIAIS

O metal de base adotado foram barras de aço trefiladas SAE 1020, com corpos de prova nas seguintes dimensões:

- 185,00 mm (milímetros) de comprimento;
- 63,50 mm (milímetros) de largura; e
- 12,70 mm (milímetros) de espessura.

Já quanto ao metal de adição foi selecionado o arame tubular inoxidável martensítico, especificado segundo a norma ASME 2007, seção II, parte C (AWS SFA 5-22) como AWS EC 410 NiMo MC. O diâmetro do arame adotado foi de 1,2 milímetros (mm).

3.2 EQUIPAMENTOS

Um grande número de equipamentos foi organizado para compor a bancada de experimentos (Figura 8). Essa bancada ficou composta por uma fonte de soldagem, uma tartaruga de soldagem e um sistema de aquisição de dados com amperímetro e voltímetro.

Na Tabela 1 segue a relação destes equipamentos utilizados na bancada:

Tabela 1 - Equipamentos utilizados na bancada de ensaios.

EQUIPAMENTO	MODELO	FABRICANTE	OBSERVAÇÕES
Fonte de soldagem multiprocesso	Inversal 450	IMC soldagem	- Corrente: contínua ou alternada; - Corrente nominal: 450A (amperes); - Tensão de entrada: 220, 380 ou 440V (volts) trifásica.
Tocha reta refrigerada a água	Tocha MIG Reta TBI 511 AUT-2,0m	TBI	- Diâmetro utilizável: 1,2 a 2,4 mm (milímetros)
Carro motriz: tartaruga de soldagem com deslocamento controlável nos eixos X e Y	Tartilope V2	SPS – Sistema e Processos de Soldagem	- Eixo X: velocidade até 160 cm/min (centímetros por minuto) - Eixo Y: velocidade até 300 cm/min (centímetros por minuto)
Sistema de alimentação de arame	STA-20 / digital	IMC/LABSOLDA - UFSC	-
Sistema de aquisição de dados modular	Ni cDAQ-9172	National Instruments	-
Transdutor de corrente para placa de aquisição	600R010VAC-220VAC	SECON – Sensores e Instrumentos	- 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 tensão para placa de aquisição	100V010VAC-220VAC	SECON – Sensores e Instrumentos	- Faixa de medição: 0 a 100V (volts) para corrente contínua.
Medidor de velocidade de alimentação de arame	MVA-1	SPS-Sistemas e processos de Soldagem	-

Fonte: (Autoria Própria)

A Figura 8 representa de forma clara a localização destes equipamentos e a Figura 9 apresenta a disposição dos aparelhos que compõem o sistema de aquisição que permitiram a medição dos valores de corrente e tensão:

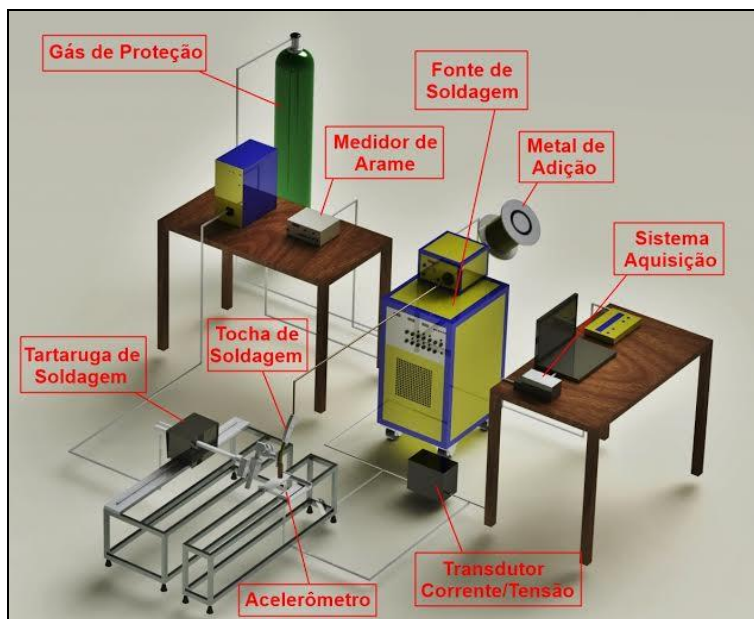


Figura 8 – Distribuição e Localização dos Equipamentos Utilizados.
Fonte: (Autoria Própria)

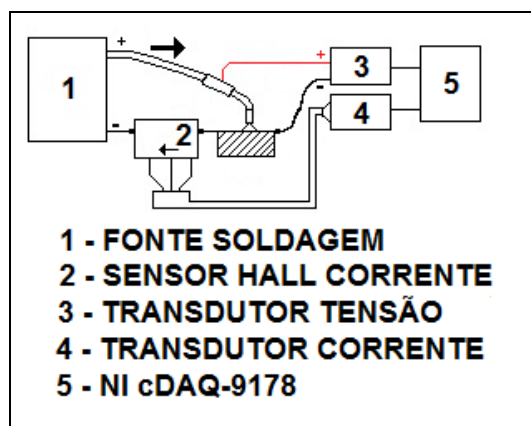


Figura 9 – Distribuição e Localização do Sistema de Aquisição.
Fonte: (Autoria Própria)

Como pode ser observado na Figura 8, a realização dos ensaios foi efetuada em duas bancadas, onde uma utilizada na fixação dos corpos de prova e outra para fixação do sistema de deslocamento da tocha. Isso, para evitar qualquer vibração no deslocamento da tocha que possa influenciar nos resultados aquisitados.

Além destes componentes, ainda foi inserido ao conjunto da bancada de ensaios um dispositivo de fixação, ilustrado na Figura 10, com a finalidade

de garantir a posição no mesmo local, sem a movimentação durante a realização do cordão de solda nos corpos de prova.

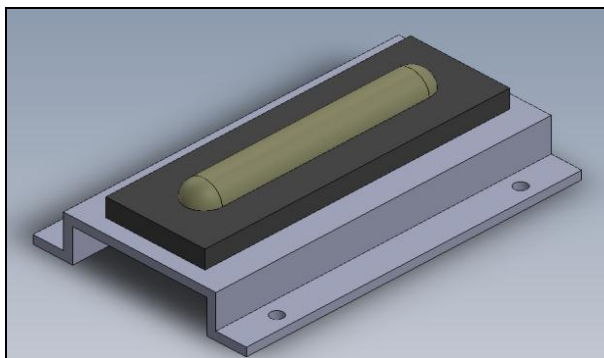


Figura 10 – Dispositivo de posicionamento dos corpos de prova. Fonte: (Autoria Própria)

Outros equipamentos também foram fundamentais na preparação dos corpos de prova e coleta de dados iniciais necessários para formular os resultados.

Na Tabela 2 estão descritos estes demais instrumentos utilizados:

Tabela 2 - Demais instrumentos utilizados.

EQUIPAMENTO	MODELO	FABRICANTE	OBSERVAÇÕES
Forno mufla para aquecimento	NT-380	Novatécnica	- Faixa de temperatura: 100 a 110°C (graus celsius)
Gabinete de jateamento por sucção	GS-9075X	CMV Indústrias Mecânicas	-
Balança semi-analítica	BL3200H	Shimadzu	- Precisão: 0,01g (gramas); - Capacidade máxima: 3100g (gramas).
Serra de fita contínua	FM-335	Franho	-
Câmera digital	DSLR-A350X – 14.2 Megapixels	SONY	-
Termômetro infravermelho digital portátil	ITTI-1600	INSTRUTEMP	- Faixa de temperatura: -32 a 1650°C (graus celsius).

Fonte: (Autoria Própria)

Todos os processos para realização da soldagem foram executados na oficina da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Cornélio Procópio.

O estudo dos dados coletados foi através de construção de tabelas, análises e geração gráficos, procedimentos que foram realizados parte em computadores da universidade, quando necessidade de programas mais específicos, como software MatLab[®], e parte em notebook particular, para programas comuns, como Microsoft Word 2010[®] e Microsoft Excel 2010[®].

3.3 METODOLOGIA

Todas as etapas executadas seguiram conforme o cronograma apresentado na proposta do pré-projeto deste trabalho. Cada processo realizado na soldagem e coleta de dados foi controlado, para assim garantir que os fatores de interferência fossem praticamente nulos, assim possibilitando uma conclusão mais exata e os melhores resultados.

3.3.1 Parâmetros de soldagem

Durante a pesquisa bibliográfica aos temas relacionados à este trabalho, algumas obras foram encontradas. A pesquisa partiu de pontos já definidos inicialmente, como por exemplo, buscas sobre o método de soldagem por arame tubular, e assim tópicos relacionados também foram se destacando.

Toda essa procura serviu como base para serem elencados alguns itens que se manteriam constantes durante os experimentos. Já as demais variáveis necessárias ao processo delimitadas a partir de ensaios experimentais.

Como este trabalho foi realizado em parceria com a tese de doutorado do professor Celso Alves Corrêa, coorientador também deste trabalho, as variáveis empregadas nos ensaios já foram delimitadas e determinadas segundo procedimentos experimentais embasados pelo método Taguchi e pesquisas bibliográficas em diversas fontes: (MACHADO, 1996; BRAGA, 1997; BARRA, 1998; MARQUES, 2009; NORRISH, 2006; RAPPL, 2009; PALLANI et al, 2006).

Portanto, ficando definido que os ensaios realizados são soldagens de deposição com um único cordão de solda pelo método de arame tubular, isso devido a grande maioria dos trabalhos abordarem este tema e apresentarem os parâmetros buscados.

A Tabela 3 a seguir apresenta os parâmetros de soldagem determinados como constantes:

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

PARÂMETRO	NÍVEL
Polaridade do Eletrodo	CCEP
Gás de Proteção	98% Argônio + 2% Oxigênio
Vazão do Gás	18 l/min
Ângulo da Tocha	90°
Posição de Soldagem	Plana
Temperatura de Interpasse	150 °C
Velocidade de Alimentação do Arame	8,5 m/min
Quantidade de Cordões	01

Fonte: (Autoria Própria)

Da mesma forma, ficam definidas as variáveis de influência da soldagem extraídas segundo as análises e representadas na Tabela 4:

Tabela 4 - Valores dos ensaios com corrente convencional.

VARIÁVEIS	NÍVEIS
Corrente Média de Soldagem (A)	200
	230
Velocidade de Soldagem (mm/min)	300
	350

Fonte: (Autoria Própria)

Estes índices determinados são necessários para possibilidade de se iniciarem os ensaios e coleta dos primeiros dados. Já o tratamento estatístico dos resultados obtidos será realizado pelo método da análise de variância com o auxílio de “software” comercial MINITAB.

3.3.2 Corpos de Prova

Todos os corpos de prova foram devidamente tratados para que nenhum fator de interferência possibilite a alteração dos resultados.

Inicialmente as barras trefiladas do aço SAE 1020 (metal de base), foram cortadas nas dimensões mencionadas no tópico materiais utilizados.

Após esse processo de dimensionamento e antes de serem soldados, os corpos de prova passaram por um jateamento abrasivo com granalha de aço angular G-25 S-280, com o objetivo de deixar a superfície completamente limpa, sem qualquer resíduo de graxa, óleo ou contaminantes que pudessem interferir na qualidade ou parâmetros de análise da solda. Para esse jateamento foi utilizado o gabinete por sucção da CMV, modelo GS-9075X.

Por fim, ainda houve o cuidado com o controle da temperatura no preparo destes materiais para obtenção das análises necessárias.

Para obtenção de uma temperatura de interpasse com 150°C, fator estipulado com base no levantamento bibliográfico, os corpos de prova foram aquecidos em um forno, especificado na Tabela 2, no qual atingiam uma temperatura de 200°C.

Ao alcançar esta temperatura, ocorre a transferência dos corpos de prova à bancada de ensaios e posicionados no dispositivo de fixação. Posteriormente, monitorados através de um termômetro infravermelho digital, que, ao atingir a temperatura de interpasse desejada, ocorria a realização da soldagem. Este procedimento de aquecimento e monitoramento da temperatura foi adotado em todas as amostras.

3.3.3 Características econômicas

Em um processo de soldagem vários fatores podem ser levados em conta para verificar a eficiência de um processo de soldagem e a combinação entre os parâmetros utilizados se de fato são as melhores opções.

Neste trabalho será feito um levantamento e análise de resultados levando em conta três requisitos já descritos na revisão bibliográfica para determinação das características econômicas, que seriam:

- Taxa de fusão;
- Taxa de deposição;
- Rendimento do processo.

As equações 01, 02 e 03 nos proporcionam obter estes índices e assim formular conclusões.

Como é possível verificar, os cálculos necessários dependem apenas de substituição de variáveis obtidas antes, durante e depois do processo de soldagem.

Um destes dados é a densidade linear do metal de adição. Para isso, ocorre o corte e pesagem de 30 amostras do metal de adição (arame tubular AWS EC410NiMo MC) com um comprimento de 100 mm (milímetros). O peso de cada eletrodo apresentado por uma balança modelo BL3200H, descrita na Tabela 2.

Após a essa coleta, os corpos de prova ainda passaram por identificação individual e verificação do peso tanto antes como depois da soldagem, fatores também essenciais para determinação das características econômicas.

Por fim, um último valor necessário para o equacionamento foi a velocidade de alimentação do arame e o tempo de soldagem, estes obtidos através do medidor de quantidade de arame consumido (MVA-1), item especificado na Tabela 1.

Os dados ainda passaram por um tratamento estatístico a partir do programa MINITAB a partir do método de análise de variância.

3.3.4 Estabilidade do Arco Elétrico

Como descrito na revisão bibliográfica deste trabalho, o dimensionamento da estabilidade de um arco elétrico durante um processo de soldagem, pode ser obtido de algumas maneiras diferentes, porém aqui o objeto de estudo foi na verificação deste tópico através da coleta de valores de corrente e tensão, obtidos da leitura de uma placa de aquisição. A partir da aquisição destes valores é possível analisar a facilidade e regularidade da transferência metálica e da transferência de carga elétrica.

Em resumo, um arco estável implica na facilidade de uma operação de soldagem, assim obtendo uma geometria o mais regular possível do cordão de solda. Para isso, atende a dois princípios: a transferência fácil e uniforme de metal e de carga elétrica.

Com base nestes pontos de estudo, este trabalho adota a metodologia empregada por Braga (1997). Este pesquisador parte da realização de cálculos embasados nestes princípios básicos para se atingir uma estabilidade do arco elétrico a partir de valores de corrente e tensão coletados pelo processo de soldagem.

➤ Facilidade de Transferência Metálica

A facilidade de uma transferência metálica é obtida a partir da verificação da facilidade de ocorrência de um curto-circuito (F_{cc}) e facilidade de transferência da gota no curto-circuito (F_{tm}).

$$F_{cc} = (1/T) \cdot 1000 \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

(Equação 04)

$$F_{tm} = (1/t_{cc}) \cdot 1000 \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

(Equação 05)

onde,

- T é o período médio de transferência (ms);
- t_{cc} é o tempo médio de curto-circuito (ms).

➤ Regularidade de Transferência Metálica

A regularidade da transferência metálica é mensurada a partir da regularidade de ocorrência de curto-circuito (R_{cc}) e regularidade de transferência da gota no curto-circuito (R_{tm}).

$$R_{cc} = T / \sigma T \quad (\text{Equação 06})$$

$$R_{tm} = t_{cc} / \sigma t_{cc} \quad (\text{Equação 07})$$

onde,

- σT é o desvio padrão do período médio de transferência (ms);
- σt_{cc} é o desvio padrão do tempo médio de curto-circuito (ms).

➤ Avaliação da estabilidade do arco Elétrico (Software “Matlab®”)

Após a aquisição dos valores de corrente e tensão obtidos através da placa de aquisição, estes passaram por uma análise por meio de programações no Matlab®, que permitiram a obtenção de valores precisos e de forma rápida. Além disso, também houve uma análise estatística proporcionada pelo método de análise de variância alcançado a partir do estudo no MINITAB, oferecendo maior confiabilidade nos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico do trabalho são apresentados os valores e discussões em relação aos resultados obtidos a partir dos ensaios segundo parâmetros determinados.

São apresentados os dados necessários coletados dos experimentos, bem como, a discussão de validade e confiabilidade dos valores, permitindo chegar a conclusões simples e afirmações coerentes.

As respostas resultantes permitem diagnosticar se as variáveis escolhidas foram satisfatórias para um processo de soldagem por arame tubular com corrente convencional.

O foco desta análise é demonstrar as potencialidades do processo avaliadas pela perspectiva das características econômicas e estabilidade do arco elétrico.

4.1 CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS

Nesta seção estão apresentados todos os resultados atingidos através da soldagem, segundo parâmetros determinados e seguindo os passos descritos na metodologia (tópico 3.3.3). Como já mencionado, a avaliação das características econômicas se embasou na taxa de fusão, taxa de deposição e rendimento, conforme equações 01, 02 e 03, citadas na revisão bibliográfica (tópico 2.4).

Os valores médios dos resultados obtidos nos ensaios estão na Tabela 5:

Tabela 5 - Resultados das características econômicas.

Corrente Média (A)	Velocidade de Soldagem (mm/min)	DBCP (mm)	Taxa de Fusão (kg/h)	Taxa de Deposição (kg/h)	Rendimento Processo (%)
200	300	33	3,85	3,31	85,97
200	350	36	4,01	3,27	81,55
230	300	36	3,84	3,39	88,28
230	350	33	4,03	3,38	83,87

Fonte: (Autoria Própria)

A Tabela 6 apresenta a ANOVA. Essa análise de variância foi feita de cada variável e da interação entre dois fatores.

Tabela 6 - Resultados da ANOVA para as características econômicas.

Fator	Taxa de Fusão (kg/h)	Taxa de Deposição (kg/h)	Rendimento Processo (%)
1 – Corrente Média (A)	0,731	0,255	0,170
2 – Velocidade de Soldagem (mm/min.)	0,401	0,080	0,000
3 – Distância Bico Contato Peça (mm)	0,048	0,094	0,711
Interação – 1 x 2	0,031	0,131	0,551
Interação – 1 x 3	0,132	0,046	0,010
Interação – 2 x 3	0,176	0,089	0,134

Fonte: Autoria Própria.

Para melhor compreensão e análise dos resultados quanto às características econômicas temos os valores apresentados na Tabela 5 transformados em gráficos nas Figuras 11 a 13.

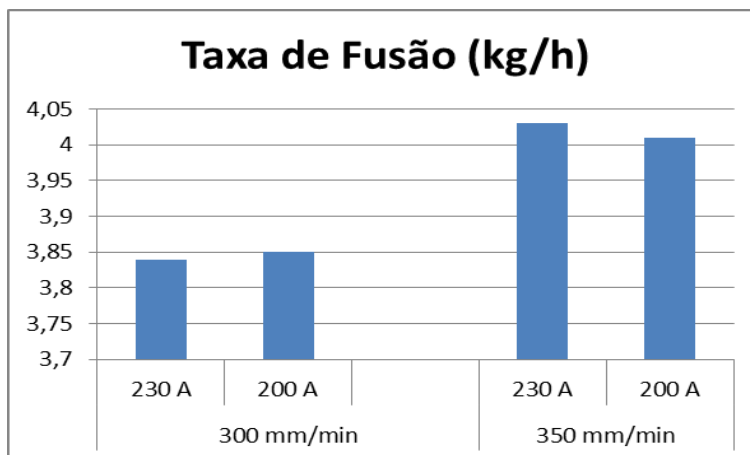


Figura 11 – Taxa de fusão obtida pelo processo de soldagem.
Fonte: (Autoria Própria)

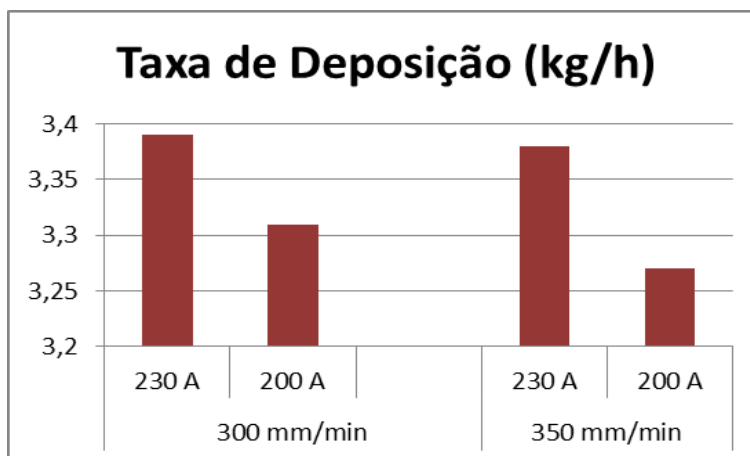


Figura 12 – Taxa de deposição obtida pelo processo de soldagem.
Fonte: (Autoria Própria)

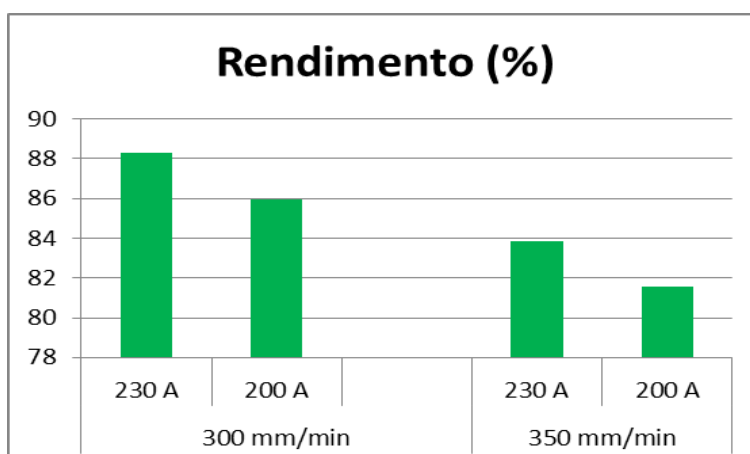


Figura 13 – Rendimento obtido pelo processo de soldagem.
Fonte: (Autoria Própria)

De acordo com a Tabela 5, para corrente de 200A a taxa de fusão variou de 3,85 e 4,01 kg/h, enquanto na corrente de 230A o valor da taxa de fusão variou entre 3,84 e 4,03 kg/h.

Na ANOVA (Tabela 6) observa-se que a taxa de fusão foi afetada apenas pela distância bico de contato peça ($\alpha = 0,048\%$) e pela interação entre corrente média e velocidade de soldagem ($\alpha = 0,031\%$).

Na soldagem de revestimento é aconselhável a maior taxa de fusão possível.

Porém ainda devemos observar a taxa de deposição e o rendimento, onde o desejável, também é a maior taxa de deposição. Na Figura 12 estão apresentados graficamente os resultados da taxa de deposição. De acordo com a Tabela 5, a taxa de deposição de 200A variou entre 3,27 e 3,31, enquanto para a corrente de 230A os resultados variam entre 3,38 e 3,39.

Pela ANOVA a taxa de deposição é afetada apenas pela interação entre a corrente média e a distância bico de contato peça, já a velocidade de soldagem afetou a diluição ($\alpha = 0,046\%$).

Por fim, a Figura 13 apresenta o rendimento alcançado. Para corrente de 200A o rendimento variou entre 81,55% e 85,97%. Já para corrente de 230A, temos a variação entre 83,87% e 88,28%.

De acordo com a ANOVA apresentada na Tabela 6, a velocidade de soldagem afeta o rendimento do processo ($\alpha = 0,000\%$), e também a interação entre a corrente média e a distância bico de contato peça.

Portanto verifica-se, segundo HIRATA et al (2014), que o rendimento de um processo de soldagem está diretamente ligado à otimização operacional. Afinal, quanto maior o rendimento, maior o volume de solda se forma com a mesma energia despendida. E no geral, quanto maior a energia de soldagem, também maior o volume da poça fundida. Sendo essa energia podendo ser aumentada por parâmetros elétricos como pela vazão do gás de proteção. Assim, fica comprovado a partir dos ensaios, que aqueles que adotaram valores maiores de corrente resultaram nos melhores resultados.

4.2 ESTABILIDADE DO ARCO

Para uma estabilidade no processo de soldagem inúmeras variáveis podem ser manipuladas em busca deste objetivo. Como descrito na metodologia, o estudo foi realizado seguindo os procedimentos do pesquisador Braga (1997). Em síntese, temos um conjunto de variáveis e em cima delas foi realizada uma análise de estabilidade do arco através de cálculos com base nos valores de tensão capturados pela placa de aquisição durante o processo de soldagem.

Como já explicitado na revisão bibliográfica (tópico 2.5) um dos métodos para verificação desta estabilidade é a partir do desvio padrão dos dados como valores de corrente e tensão, sendo quanto menor o resultado encontrado, mais estável. Portanto, avaliando os desvios e a variância dos picos de tensão é que podemos verificar quais os melhores parâmetros para alcançar um bom desempenho.

Inicialmente, foi levantado a partir de programação no software Matlab[®] os gráficos que apresentaram o comportamento do processo. Como a placa de aquisição capturou 102399 pontos, as análises aconteceram em intervalos de tempo.

Para apresentação dos resultados foram trabalhados ensaios com o mesmo conjunto de níveis adotados para a determinação das características econômicas. A Tabela 4 apresentada anteriormente indicou estas variáveis.

Para que de fato ocorra um curto-circuito com transferência metálica, é necessário que aconteça um pico na corrente e um pico na tensão, logo esses são os pontos mais importantes para que seja válida todas as análises e possam ser utilizadas as equações pré-determinadas, afinal elas tratam da facilidade de transferência metálica e facilidade de ocorrência de um curto-circuito, bem como sua regularidade. Assim, a partir da determinação destes pontos e emprego dos cálculos é que se possibilita a apresentação dos resultados almejados.

No programa Matlab[®] foram limitadas essas duas condições: trabalhar com intervalo de tempo e aplicar os cálculos apenas nos pontos de pico de tensão.

As Figuras 14 a 17 abaixo, ilustram os picos que acontecem tanto na corrente como na tensão. O intervalo de tempo utilizado nos cálculos foram de 20,0 aos 30,0 segundos, porém nestes gráficos apresenta-se apenas parte destes picos para melhor visualização:

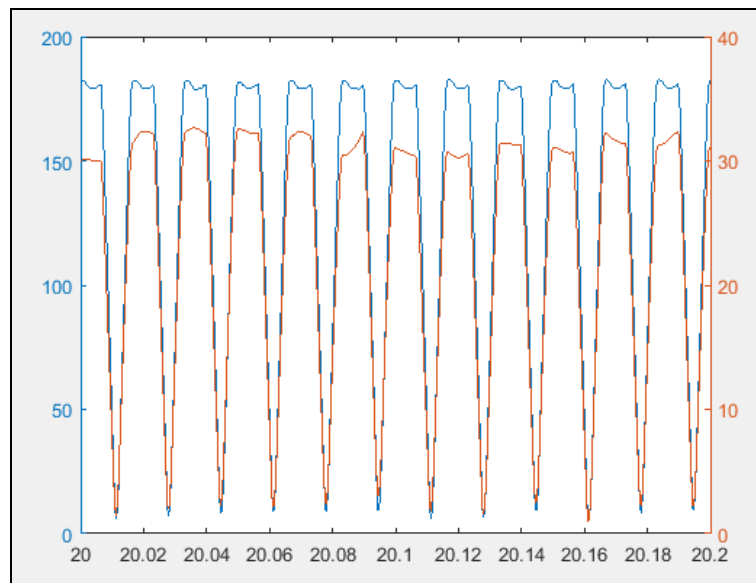


Figura 14 - Picos de corrente e tensão. (200 A – 300 mm/min).
Fonte: Autoria Própria

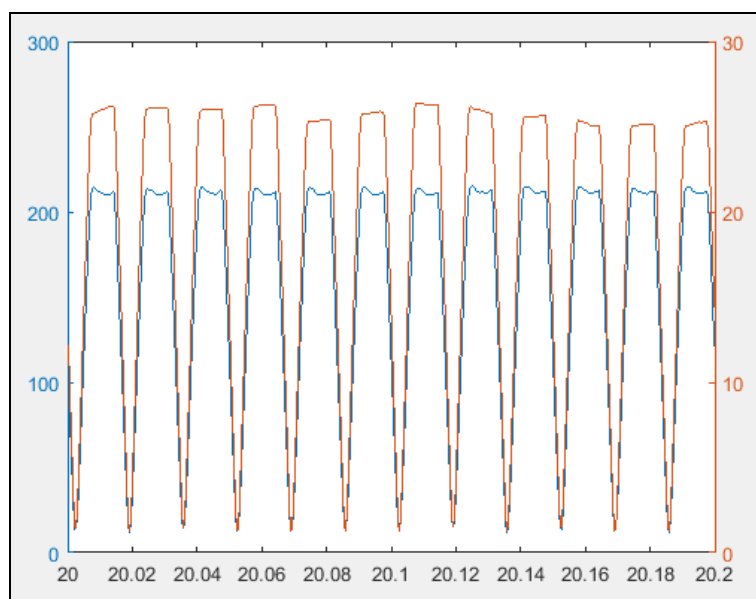


Figura 15 - Picos de corrente e tensão. (200 A – 350 mm/min).
Fonte: Autoria Própria

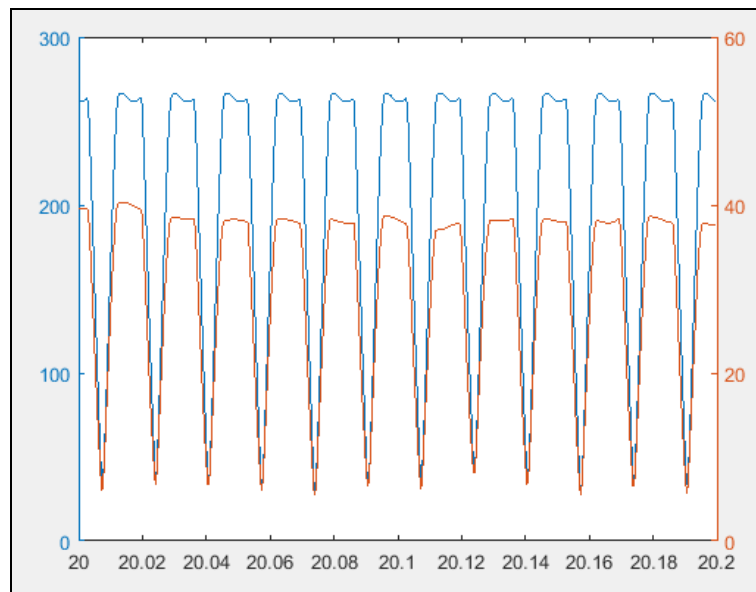


Figura 16 - Picos de corrente e tensão. (230 A – 300 mm/min).
Fonte: Autoria Própria

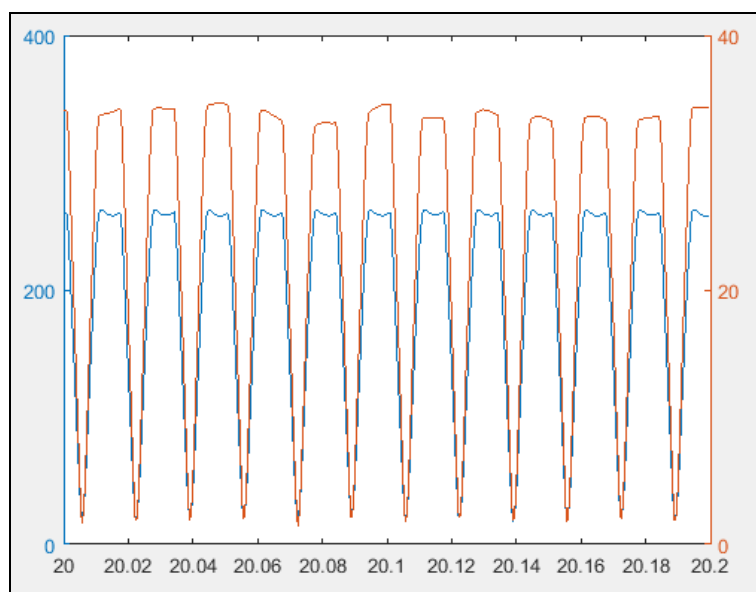


Figura 17 - Picos de corrente e tensão. (230 A – 350 mm/min)
Fonte: (Autoria Própria)

Após a seleção dos pontos necessários, as equações deduzidas segundo a metodologia adotada foram inseridas ao programa. A partir delas, obtemos os valores da facilidade de transferência da gota no curto-circuito (F_{tm}), facilidade de ocorrência de curto-circuito (F_{cc}), quantidade de picos (i) e suas respectivas regularidades. Esses valores são apresentados na Tabela 7:

Tabela 7 - Resultados da facilidade de transferência metálica em cada ensaio.

ENSAIOS	F_{tm}	R_{tm}	F_{cc}	R_{cc}	i
200A e 300 mm/min	0,000015937	0,7956	0,3529	1,3068	1308
230A e 300 mm/min	0,000011684	0,7222	0,2838	1,4537	1150
200A e 350 mm/min	0,000014399	0,7326	0,4401	1,1305	1665
230A e 350 mm/min	0,000011957	0,7087	0,3484	1,2793	1338

Fonte: (Autoria Própria)

Os resultados apresentados apontam que os ensaios onde foram adotadas correntes de 200A, encontraram os maiores índices.

Por fim, houve a determinação dos resultados médios, desvio padrão e variância dos picos de tensão para cada ensaio no intervalo de tempo determinado. A partir deles, também se verifica quais parâmetros oferecem maior estabilidade ao arco e conseqüentemente, maior estabilidade ao processo, afinal quanto menor estes resultados, mais estável. A Tabela 8 apresenta os valores:

Tabela 8 - Resultados do desvio padrão e variância em cada ensaio.

ENSAIOS	MEAN	STD	VAR	i
200A e 300 mm/min	29,3291	1,1459	1,313	1308
230A e 300 mm/min	37,3486	1,0216	1,0438	1150
200A e 350 mm/min	25,4142	0,9532	0,9086	1665
230A e 350 mm/min	33,1359	0,589	0,3469	1338

Fonte: (Autoria Própria)

Pela Tabela 8, observamos que os parâmetros que utilizaram a corrente de 230A demonstraram os menores resultados para desvio padrão e variância.

As Figuras 18 a 20 apresentam a conversão destes resultados na forma gráfica para maior clareza:

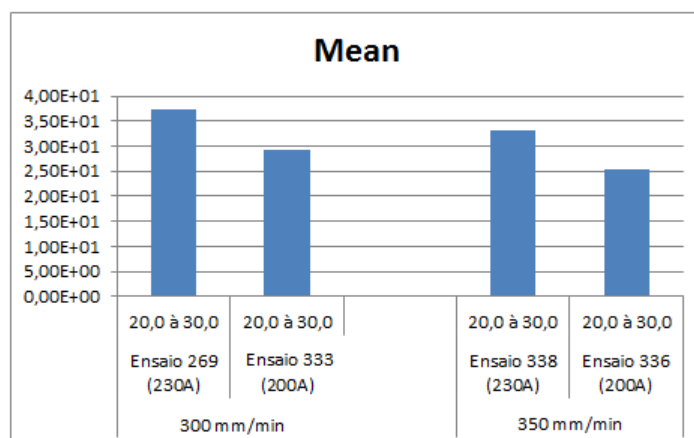


Figura 18 - Resultado da média dos picos de tensão em cada ensaio.
Fonte: (Autoria Própria)

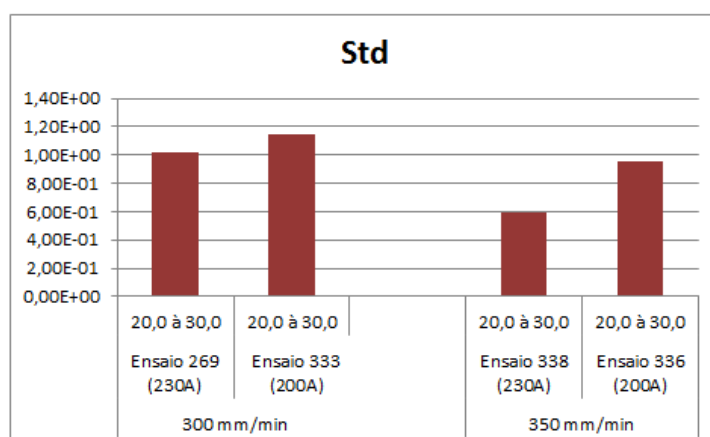


Figura 19 - Resultado do desvio padrão dos picos de tensão em cada ensaio.
Fonte: (Autoria Própria)

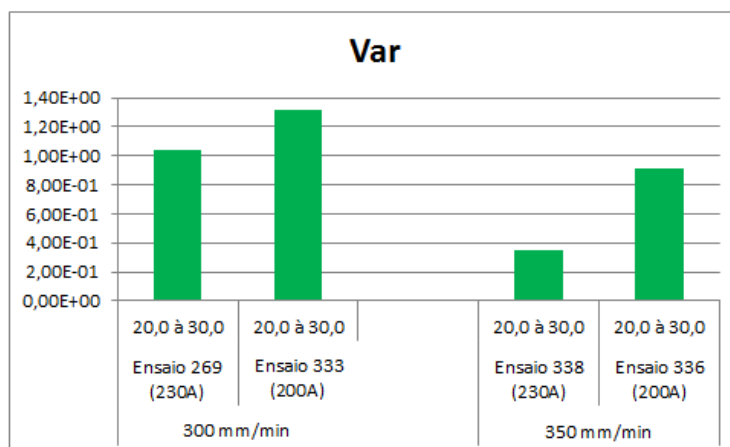


Figura 20 - Resultado da variância dos picos de tensão em cada ensaio.
Fonte: (Autoria Própria)

Portanto, segundo Braga (1997), os índices que obterem os maiores resultados para facilidade de transferência metálica ou os menores valores de desvio padrão e variância, será a característica que resultará em melhor estabilidade do arco. Logo, quando analisando se um arco é estável por meio dos dados da facilidade de transferência metálica, segundo os ensaios realizados, verifica-se que foram aqueles onde adotaram a corrente de 200A.

Já em análise a partir dos valores de desvio padrão e variância dos picos de tensão, verificamos maior condição de estabilidade para os que adotaram a corrente de 230A, o que significa que, os dados tendem a estarem mais próximos da média, houve pouca dispersão. Outro dado que confirma esta condição é a partir da quantidade de picos existentes em cada ensaio no intervalo de tempo determinado, onde aqueles que utilizaram correntes menores obtiveram maior quantidade de picos, já os ensaios com corrente de maior grandeza apresentaram menor número. Ou seja, um menor número de picos gera uma maior estabilidade.

5 CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho estão apresentados abaixo com base nas discussões e teorias encontradas a partir da revisão bibliográfica. As variáveis de influência e suas interações foram importantes para controlar o processo, possibilitando chegar aos resultados satisfatórios. A utilização do método TAGUCHI e as análises estatísticas realizadas através da ANOVA.

5.1 CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS

- Os ensaios que trabalharam com corrente de 230A possuíram o melhor desempenho econômico, pois atingiram os melhores resultados de taxa de fusão, taxa de deposição e rendimento.
- A distância do bico contato peça e a interação entre a corrente média e a velocidade de soldagem foram os fatores de maior influência nos valores da taxa de fusão.
- A taxa de deposição obteve maior influência em seus resultados pela interação da corrente média e da distância bico contato peça.
- A velocidade de soldagem e a interação entre a corrente média e a distância bico contato peça proporcionaram maior influência nos resultados do rendimento.

5.2 ESTABILIDADE DO ARCO

- Os ensaios onde apresentaram uma maior facilidade de transferência metálica foram os de maior estabilidade do arco, portanto aqueles que adotaram a corrente de 200A.

- Os ensaios que resultaram nos menores valores para desvio padrão e variância, assim como menor quantidade de picos, também apresentaram uma soldagem com um arco elétrico mais estável, portanto, aqueles que adotaram uma corrente de 230A.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aplicar a metodologia TAGUCHI em outros níveis e comparar seus resultados com os obtidos neste trabalho.
- Aplicar o conjunto aquisição de dados e programações realizadas no Matlab[®] para outros processos e/ou também com outros materiais.
- Aplicar a metodologia desenvolvida neste trabalho para outros valores e encontrar uma região de transferência metálica estável.

7 REFERÊNCIAS

BARRA, R. S. **Influência dos Procedimentos de Soldagem sobre a Resistência à Cavitação de Depósitos Obtidos com a Utilização de Arames Tubulares de Aços Inoxidáveis Ligados ao Cobalto.** Dissertação de Mestrado. Florianópolis: UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, 1998. 122p.

BRAGA, E. de. **Soldagem a Arame Tubular Autoprottegido em Corrente Pulsada.** 1997. 104 fl. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Pará. Belém.

FILHO, C. B. A. S. et al. **Estudo das Características Econômicas e Geométricas de Soldas Depositadas pelo Processo MIG Duplamente Pulsado em Alumínio Naval.** Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. FEMEC – UFU. 2003. Uberlândia/MG.

FORTES, C.. **Apostila de Arames Tubulares - ESAB.** 2004. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901098rev1_apostilaaramestubulares_ok.pdf>. Acesso em: 05 abr 2016.

GOMES, J. H. F.. **Análise e Otimização da Soldagem de Revestimento de Chapas de Aço ABNT 1020 com Utilização de Arame Tubular Inoxidável Austenítico.** 2010. 136 fl. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá.

GOMES, E. B.. **Análise do Comportamento da Soldagem por Curto-Circuito aplicado ao Processo Eletrodo Tubular através da Metodologia Taguchi.** 2006. 119 fl. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá.

HIRATA, E. K.; BELTZAC, L. F.; OKIMOTO, P. C.; SCOTTI, A.. **Influência da Corrente sobre o Rendimento Bruto de Fusão em Soldagem MIG/MAG.** Artigo técnico: Soldagem & Inspeção. 2014. Universidade Federal do Paraná. Curitiba/PR.

LOPERA, J. E. P.; ALFARO, S. C. A.; MOTTA, J. M. S. T.. **Modelagem Empírica da Transferência Goticular Projetada em Processos de Soldagem GMAW.** 2012. Vol. 17. São Paulo.

MACHADO, I. G.. **Soldagem e Técnicas conexas: processos**. Porto Alegre: ed. do autor, 1996. 477p.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3ª Ed. Belo Horizonte, Minas Gerais: UFMG, 2009. 362 p. (Didática) ISBN 9788570417480.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; BRACARENSE, A. Q.. **Soldagem – Fundamentos e Tecnologia**. 2 ed. 2010. Editora UFMG. Belo Horizonte.

MOREIRA, H. S.. **Estudo da Influência dos Parâmetros de Soldagem MIG e da Morfologia do Cordão no Comportamento à Fadiga de Juntas Soldadas de um Eixo Traseiro Veicular**. 2008. 84 fl. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

NOGUEIRA, R. M. U. et al. **Comparação da Estabilidade do Arco e da Variabilidade da Geometria de Soldas Obtidas pelos Processos MIG/MAG e Arame Tubular**. Artigo Técnico – Soldagem & Inspeção. 2015. Florianópolis/SC.

Portal Metálica: Construção Civil. **O que é soldagem**. 2015. Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/o-que-e-soldagem>.> Acesso em: 06 abr 2016

QUITES, A.. Artigo: **Definição de Soldagem**. Grupo DSEED. 2011. Disponível em: <<http://www.soldasoft.com.br/portal/generalidade/Definicao%20de%20soldagem.pdf>>. Acesso em: 31 mar 2016

SILVA, C. L. M.; SCOTTI, A.. **Avaliação de Geração de Porosidade em Ligas de Alumínio Soldadas pelas Técnicas MIG-P e MIG-PPT**. 2002. João Pessoa/Paraíba.

SOUZA, C. I.. **Análise Comparativa de Processos de Soldagem GMAW e FCAW com Transferência Metálica por Curto-Circuito na Posição Horizontal**. 2011. 121 fl. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Uberlândia. Minas Gerais.

SOUZA, D.. **Levantamento de Mapas Operacionais de Transferência Metálica para Soldagem MIG/MAG de Aço ao Carbono na Posição Plana**. 2010. 152 fl. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia. Minas Gerais.

STARLING, C. M. D.; MODENESI, P. J.. **Estudo da Transferência de Metal de um Arame Tubular “Metal Cored”**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2005.

WINK, P. R.. **Estudo das Características dos Modos de Transferência Metálica por Soldagem MAG em Processos Industriais Robotizados**. 2014. 49 fl. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUI).

ZIEDAS, S.; TATINI, I.. **Coleção Tecnologia SENAI: Soldagem**. São Paulo. 1997.