



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE
E AUTOMAÇÃO - CECAU



KÁSSIA FERNANDA DA SILVA

INSTRUMENTAÇÃO DE ROBÔ SOLDADOR PARA QUALIFICAÇÃO
DE CORDÃO DE SOLDA

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO

Ouro Preto, 2021

KÁSSIA FERNANDA DA SILVA

**INSTRUMENTAÇÃO DE ROBÔ SOLDADOR PARA QUALIFICAÇÃO
DE CORDÃO DE SOLDA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. José Alberto Naves Cocota Junior, DSc.

Coorientador: Prof. Paulo de Barros Monteiro, DSc.

**Ouro Preto
Escola de Minas – UFOP
2021**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586i Silva, Kassia Fernanda da .
Instrumentação de robô soldador para qualificação de cordão de solda.
[manuscrito] / Kassia Fernanda da Silva. - 2021.
49 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. José Alberto Naves Cocota Júnior.

Coorientador: Prof. Dr. Paulo de Barros Monteiro.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Controle e Automação .

1. Soldagem - Eletrodos. 2. Instrumentos de medição. 3. Soldagem - Soldagem robotizada. 4. Qualificação. I. Cocota Júnior, José Alberto Naves. II. Monteiro, Paulo de Barros. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E AUTOMACAO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Kássia Fernanda da Silva

Instrumentação de Robô Soldador para Qualificação de Cordão de Solda

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira de Controle e Automação

Aprovada em 16 de abril de 2021

Membros da banca

DSc. José Alberto Naves Cocota Júnior – Orientador (UFOP)
DSc. Paulo Marcos de Barros Monteiro – Coorientador (UFOP)
DSc. Adilson Rodrigues da Costa – Professor Convidado
DSc. Bruno Nazário Coelho – Professor Convidado (UFOP)

José Alberto Naves Cocota Júnior, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 16/04/2021



Documento assinado eletronicamente por **Jose Alberto Naves Cocota Junior, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/04/2021, às 12:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0160371** e o código CRC **879A7348**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.003506/2021-09

SEI nº 0160371

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: 3135591533 - www.ufop.br

AGRADECIMENTOS

Ao meu companheiro, Lázaro, que sempre me apoiou em minha vida acadêmica.

Ao meu orientador, Prof. José Cocota, pelo apoio no trabalho e pelo conhecimento agregado.

Ao meu coorientador, Paulo Monteiro, pelo conhecimento e pelos conselhos pessoais ao longo do curso.

Aos meus pais e irmãos que fizeram o possível para que esse trabalho fosse concluído.

Aos meus amigos, Anna Cristyna e Cleyson, por todo o suporte emocional ao longo do curso.

Aos meus amigos, Caio Andrade e Santino, pelo suporte técnico no desenvolvimento do sistema de aquisição de dados.

Ao Prof. Adilson Rodrigues da Costa pela disponibilidade do Laboratório de Engenharia de Superfícies e Técnicas Afins.

Ao engenheiro Luciano de Oliveira e toda a equipe da Fundação Gorceix pela prontidão e auxílio ao projeto.

“Nunca deixe de lutar por aquilo que você acredita.” (Overwatch)

RESUMO

O processo de soldagem SMAW (Shielded Metal Arc Welding) é a soldagem por eletrodos revestidos comumente utilizada por conta de seu baixo custo e simplicidade. Porém é um processo predominantemente manual, de baixa produtividade e difícil controle de qualidade. É proposto a robotização do processo e instrumentação para mensurar a qualidade do cordão de solda. Foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados para mensurar os valores de tensão e corrente durante o processo de soldagem. Foi elaborada uma placa de circuito impresso com a finalidade de estabelecer a comunicação entre o Arduino Uno com o sensor de corrente SCT-013-000 e o sensor de tensão ZMPT101b. Foram realizados ensaios de soldagem no Laboratório de Engenharia de Superfícies e Técnicas Afins da Universidade Federal de Ouro Preto e no Laboratório de Automação e Controle da Fundação Gorceix com o intuito de mensurar os valores de tensão e de corrente quando ocorre uma descontinuidade de perfuração ou de cratera no cordão de solda. A obtenção desses dados decorreu de soldagem manual utilizando o eletrodo AWS E6013 em uma chapa de aço SAE1020. Foram obtidos dezenove cordões de solda, sendo nove com perfuração e dez sem perfuração. O comprimento médio dos cordões foi de 78,9mm. Não houveram grandes diferenças nos valores de corrente máxima, com média de 128A, e de tensão mínima, com média de 8,3V, dos cordões com perfuração e sem perfuração. Foram verificados distúrbios na corrente no momento em que ocorre uma descontinuidade de cratera ou de perfuração. Não foram encontradas relações substanciais correlacionando os valores de tensão com a presença de descontinuidade.

Palavras-chaves: Soldagem com eletrodos revestidos. Instrumentação. Soldagem robotizada. Qualificação.

ABSTRACT

The welding process SMAW (Shielded Metal Arc Welding) is a welding process with uses covered electrodes. It is common because its cost is low and it is simple. But it is a manual process, low productivity, and hard control. It is proposed the robotization of the process and instrumentation to measure the weld bead quality. A data acquisition system was developed to measure voltage and current during the welding process. A printed circuit board was made to establishing communication between the Arduino Uno and SCT-013-000 current sensor and ZMPT101b voltage sensor. Welding tests carried out at Laboratório de Engenharia de Superfícies e Técnicas Afins at Universidade Federal de Ouro Preto and at Laboratório de Automação e Controle from Fundação Gorceix to measure the voltage and current values when a shrinkage cavity or burn through discontinuities occurs in the weld bead. These data were obtained by manual welding using the AWS E6013 electrode on a SAE1020 steel plate. Nineteen weld beads were obtained, nine with burn through and ten without burn through. The average length of the weld beads is 78.9mm. There were no major differences in the values of maximum current, with an average of 128A, and minimum voltage, with an average of 8.3V, of the weld beads with and without burn through. Current disturbances were noted at the time a shrinkage cavity or burn through discontinuities occurs. No substantial relationships were found correlating the voltage values with the presence of a discontinuity.

Key-words: Covered electrodes welding. Instrumentation. Robotized welding. Qualification.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema processo de soldagem com eletrodo revestido.	18
Figura 2 – Circuito divisor de tensão.	21
Figura 3 – Esquemático transdutor de corrente não-invasivo.	22
Figura 4 – Dados do eletrodo E6013 baseados em sua nomenclatura de acordo com a norma ASME BPVC.II.C-2019.	24
Figura 5 – Estação de soldagem robotizada presente no Laboratório LESTA.	25
Figura 6 – Circuito de teste.	26
Figura 7 – Placa Arduino Uno.	26
Figura 8 – Ligação do sensor de tensão ZMPT101b.	28
Figura 9 – Sinal de saída do sensor SCT-013-000 sem tratamento externo.	29
Figura 10 – Sinal de saída do sensor SCT-013-000 após implementação do circuito de transformação de sinal.	30
Figura 11 – Sinal de saída do sensor SCT-013-000 após implementação do circuito de transformação de sinal e circuito de offset.	30
Figura 12 – Esquemático da montagem do circuito de transformação de sinal e circuito offset.	31
Figura 13 – Projeto da placa de circuito impresso.	31
Figura 14 – Placa de circuito impresso desenvolvida. Vista da frente.	32
Figura 15 – Placa de circuito impresso desenvolvida. Vista da parte de trás.	32
Figura 16 – Chapa com os cordões dos ensaios 1 a 6.	34
Figura 17 – Cordão de solda do ensaio 3, com o valor de corrente (A) representado em azul e o valor de tensão (V) representado em laranja.	35
Figura 18 – Chapa com os cordões dos ensaios 1 a 23.	36
Figura 19 – Dados completos do ensaio 1, com o valor de corrente (A) representado em azul e o valor de tensão (V) representado em laranja.	37
Figura 20 – Dados segmentados do ensaio 1, com o valor de corrente (A) representado em azul e o valor de tensão (V) representado em laranja.	37
Figura 21 – Cordão de solda 8 com a descontinuidade de perfuração, indicada em vermelho, com o valor de corrente (A) representado em azul e o valor de tensão (V) representado em laranja.	39
Figura 22 – Cordão de solda 11 com a descontinuidade de perfuração, indicada em vermelho, com o valor de corrente (A) representado em azul e o valor de tensão (V) representado em laranja.	40
Figura 23 – Cordão de solda 18 com a descontinuidade de perfuração, indicada em vermelho, com o valor de corrente (A) representado em azul e o valor de tensão (V) representado em laranja.	41

Figura 24 – Cordão de solda 12 com a descontinuidade de cratera, indicada em vermelho, com o valor de corrente (A) representado em azul e o valor de tensão (V) representado em laranja.	42
Figura 25 – Cordão de solda 14 com a descontinuidade de cratera, indicada em vermelho, com o valor de corrente (A) representado em azul e o valor de tensão (V) representado em laranja.	43
Figura 26 – Cordão de solda 16 com a descontinuidade de cratera, indicada em vermelho, com o valor de corrente (A) representado em azul e o valor de tensão (V) representado em laranja.	44
Figura 27 – Cordão de solda 4 classificado como normal, com o valor de corrente (A) representado em azul e o valor de tensão (V) representado em laranja. . . .	45
Figura 28 – Cordão de solda 6 classificado como normal, com o valor de corrente (A) representado em azul e o valor de tensão (V) representado em laranja. . . .	45
Figura 29 – Cordão de solda 23 classificado como normal, com o valor de corrente (A) representado em azul e o valor de tensão (V) representado em laranja. . . .	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do Aço SAE 1020	23
Tabela 2 – Especificações técnicas da fonte transformadora Bantam 250 Serralheiro . .	25
Tabela 3 – Especificações técnicas do Arduino Uno	27
Tabela 4 – Relação entre comprimento do cordão, corrente máxima e tensão mínima de cada ensaio	34
Tabela 5 – Relação entre comprimento, corrente máxima, tensão mínima e presença da descontinuidade de perfuração em cada cordão.	38
Tabela 6 – Dados das perfurações	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BP	<i>Back Propagation</i> (Retropropagação do erro)
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DEMET	Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
FCAW	<i>Flux-cored arc welding</i> (Soldagem a arco elétrico com arame tubular)
Ip	Corrente de Pico
LESTA	Laboratório de Engenharia de Superfícies e Técnicas Afins
PI	Controlador Proporcional Integral.
RNA	Rede Neural Artificial
RMS	<i>Root Mean Square</i> (raiz do valor quadrático médio)
SAW	<i>Submerged arc welding</i> (Soldagem a arco submerso)
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i> (Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido)
SVM	<i>Support Vector Machine</i> (Máquina de vetores de suporte)
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Estado da arte	14
1.2	Objetivos gerais e específicos	16
1.3	Justificativa do trabalho	17
1.4	Estrutura do trabalho	17
2	REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1	Soldagem com eletrodos revestidos	18
2.1.1	<i>Fundamentos do processo</i>	18
2.1.2	<i>Requisitos elétricos</i>	18
2.1.3	<i>Eletrodo revestido</i>	19
2.1.4	<i>Vantagens e limitações do processo</i>	20
2.2	Instrumentação	20
2.2.1	<i>Transdutor de tensão</i>	20
2.2.2	<i>Transdutor de corrente</i>	21
3	DESENVOLVIMENTO	23
3.1	Aço de baixo carbono SAE 1020	23
3.2	Eletrodo revestido AWS E6013	23
3.3	Estação de solda	24
3.3.1	<i>Estação de solda do Laboratório LESTA</i>	24
3.3.2	<i>Estação de solda do Laboratório de Controle e Automação da Fundação Gorceix</i>	25
3.4	Instrumentação	25
3.4.1	<i>Placa de aquisição de dados</i>	26
3.4.2	<i>Sensor de tensão</i>	27
3.4.3	<i>Sensor de corrente</i>	28
3.4.3.1	Sistema de aquisição de dados	31
3.5	ISO 5817	32
3.6	Experimentos de soldagem	33
3.6.1	<i>Determinação do arco elétrico</i>	33
3.6.2	<i>Soldagem para qualificação do cordão de solda</i>	35
3.7	Segmentação dos dados	36
4	RESULTADOS	38
5	CONCLUSÃO	47

REFERÊNCIAS 48

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será abordado o conhecimento atual, contendo as técnicas e instrumentos já desenvolvidos para os processos de soldagem a arco elétrico. Serão apresentados os objetivos e as contribuições do presente trabalho, assim como a sua forma estrutural.

1.1 Estado da arte

O processo de soldagem a arco elétrico data do século XIX, porém foi a partir da Segunda Guerra Mundial que se difundiu com o desenvolvimento de maquinário bélico (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992). Atualmente, o processo de soldagem está presente nas mais diversas operações industriais, como em siderúrgicas, automobilísticas, metalúrgicas e de mineração. Dentre os processos existentes, *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) é a soldagem por eletrodos revestidos comumente utilizada por conta de seu baixo custo e simplicidade (JENNEY; O'BRIEN, 2001). Por se tratar de um processo predominantemente manual, depende da habilidade do profissional que está executando a soldagem, tornando-se um processo de baixa produtividade e difícil controle de qualidade (KANG, 1996).

A automatização dos processos de soldagem vem se tornando relevante para aumentar a confiabilidade da solda e a sua viabilidade econômica (JENNEY; O'BRIEN, 2001). Diversas pesquisas vem sendo realizadas acerca do desenvolvimento de sensores, interfaces e metodologias de controle neste seguimento.

Os ensaios não destrutivos são utilizados para supervisão da qualidade das estruturas sem danificá-las. Sua implementação é relacionada à diminuição dos custos, aumento de velocidade de inspeção e inspeção sem a necessidade de parar a operação quando comparado com as técnicas de ensaios destrutivos (CAWLEY, 2001). De acordo com Alfaro (2012), alguns parâmetros físicos como campo magnético, campo elétrico, temperatura, pressão do som e emissão de radiação podem ter seu padrão modificado de acordo com a qualidade da solda. À vista disso, tais indicadores podem ser monitorados por meio de sensoreamento com a finalidade de identificar possíveis defeitos.

Segundo Lima II e Bracarense (2010), a qualidade da solda pode ser associada ao comprimento do arco elétrico, que deve se manter constante durante todo o processo de soldagem; e à velocidade de soldagem, que deve se adequar de acordo com a taxa de deposição. Em seu trabalho, os autores propuseram controlar o comprimento do arco elétrico por intermédio das variáveis de tensão e corrente no eletrodo. Todavia, um dos empecilhos do controle da tensão dá-se ao fato de que o comprimento do eletrodo não é constante, visto que seu tamanho diminui a medida que é utilizado durante o processo de soldagem. Tal fenômeno implica na variação da resistência do eletrodo. Outro comportamento que pode comprometer o controle são as variações

da resistividade elétrica do eletrodo devido ao aumento de temperatura pelo efeito Joule (KANG, 1996).

Afim de investigar o consumo de energia aliado a qualidade e produtividade das soldas SMAW e FCAW (*Flux-Cored Arc Welding*), Silva et al. (2019) propuseram a avaliação das variáveis de corrente, tensão, velocidade de soldagem, energia de soldagem e consumo de energia e analisar as interações entre si. As leituras obtidos foram avaliadas de acordo com a geometria dos cordões de solda resultantes, sendo verificados a penetração, largura e reforço, área de penetração e área de reforço, diluição e microestrutura da solda.

De forma semelhante, Silva et al. (2016), buscaram otimizar os parâmetros do processo. Seu projeto baseou-se nas variáveis de entrada de tensão, corrente, velocidade de alimentação de arame e distância do bico de contato com a peça no processo denominado *Submerged Arc Welding* - SAW. Os experimentos foram realizados utilizando a técnica de Planejamento Fatorial, que consiste na validação de um modelo matemático para redução do número de ensaios e minimização dos erros experimentais (FERNANDES; MELO, 2017). Os valores das variáveis de entrada foram escolhidos de maneira empírica para produzirem cordões de solda com minimização dos defeitos. Com base nas análises, foi desenvolvido um dispositivo capaz de variar a distância do bocal à peça de maneira que a corrente permaneça estável para certificar a qualidade do cordão de solda.

Outros sensores, além dos elétricos, vêm sendo combinados para melhor captação dos dados de solda a arco elétrico. Sumesh et al. (2015) utilizaram as emissões acústicas aferidas por um microfone no processo SMAW. Do mesmo modo, Cocota Jr. et al. (2017) averiguaram os sinais por meio de microfone e cristal piezoelétrico. Alfaro (2012) utilizou-se também de microfone e de pirômetro para captar sinal infravermelho.

A análise dos dados pode ser realizada utilizando metodologias computacionais. As ferramentas de *Machine Learning* vêm sendo amplamente utilizadas para previsão de eventos e reconhecimento de padrões (HALL, 2016). Em seus estudos, Sumesh et al. (2015) utilizaram dos algoritmos J48 de Árvore de Decisões e de Floresta Randômica para analisar suas leituras. Foram empregadas diversas soldas no processo SMAW obtendo cordões com variados valores de corrente, tensão e velocidade. Os dados de emissão acústica coletados durante os processos foram analisados afim de obter a classificação dos cordões quanto aos possíveis defeitos de perfuração e falta de fusão.

Cocota Jr. et al. (2017) também adotaram o uso de técnicas de *Machine Learning* para classificar seus dados obtidos no processo SMAW. Por outro lado, utilizaram a combinação de dois sensores, microfone e cristal piezoelétrico, para aumentar a acurácia dos métodos de classificação. Empregaram as técnicas de Máquinas de Vetores de Suporte (SVM) e Rede Neural Artificial (RNA) com Retropropagação do Erro (BP) para a classificação em tempo real dos cordões de solda quanto a possíveis descontinuidades de cratera e de perfuração.

Com o intuito de aumentar a qualidade, repetibilidade e velocidade nos processos de soldagem e de prover segurança para os soldadores, estão sendo desenvolvidas ferramentas auxiliares, como robôs soldadores, dispositivos de soldagem e interfaces voltadas para os soldadores e também mecanização e/ou adaptações nas ferramentas já existentes (BROERING; DUTRA; JÚNIOR, 2004).

Kang (1996) propôs em seu trabalho com soldagem submersa pelo processo SMAW a criação de um mecanismo de controle de tensão para manter o comprimento do arco constante. Para obtenção de seus parâmetros ótimos de entrada, realizou diversos ensaios correlacionando a taxa de derretimento do eletrodo com a velocidade e corrente de soldagem. Seu trabalho resultou no desenvolvimento de uma pistola semi-automática, juntamente com um sistema e algoritmo para controlar a tensão.

Lima II e Bracarense (2010) apresentaram a robotização do processo e controle do comprimento do arco elétrico a partir da medição da tensão fornecida pela máquina de solda. Em seu trabalho, a trajetória do robô com o eletrodo bem como sua velocidade é calculada em malha fechada utilizando um controlador PI - Proporcional Integral. O controlador foi projetado visando manter o comprimento do arco elétrico constante e utiliza a leitura do sinal de tensão como *feedback*. Okuyama et al. (2012) desenvolveram uma interface de um sistema robótico que auxilia no manuseio e aprendizagem de soldadores inexperientes. Os soldadores utilizam o sistema para configurar os parâmetros de velocidade de deslocamento, corrente, tensão e trajetória. Sua interface foi capaz de assistir os soldadores sem experiência a completar todas as tarefas requeridas. Porém o sistema não demonstra ser adaptativo ao processo, visto que os parâmetros são inseridos apenas no início do processo.

1.2 Objetivos gerais e específicos

O presente trabalho tem como finalidade realizar o monitoramento e aquisição de dados para assistir à qualificação do cordão de solda no processo de soldagem por eletrodo revestido na estação de solda presente no Laboratório de Engenharia de Superfícies e Técnicas Afins (LESTA) do DEMET – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Para atingir tal finalidade, foi proposto implementar um sistema de aquisição de dados para amostragem de sinais de tensão e corrente, posteriormente, avaliar os parâmetros do processo.

Para isso, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Implementar um sistema de aquisição de dados para a amostragem do sinal de tensão do processo de soldagem SMAW;
- Implementar um sistema de aquisição de dados para a amostragem do sinal de corrente do processo de soldagem SMAW;
- Avaliar os experimentos e os sinais amostrados;

- Otimizar os parâmetros do processo;
- Realizar classificação dos cordões de solda.

1.3 Justificativa do trabalho

Esse trabalho irá contribuir para a continuação do desenvolvimento da primeira estação de soldagem robotizada do processo SMAW da Escola de Minas na Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, melhorando e otimizando os parâmetros já existentes em trabalho anterior realizado por [Cocota Jr. \(2017\)](#). Além de viabilizar seu uso em escala industrial, visto que a soldagem é de extrema importância para a indústria atual.

1.4 Estrutura do trabalho

O texto dessa monografia está estruturado da seguinte maneira. No capítulo 1 é abordado o estado da arte dos processos de soldagem a arco elétrico, os objetivos gerais e específicos e a justificativa do trabalho. O capítulo 2 engloba a revisão de literatura pertinente ao embasamento teórico do trabalho, com informações a respeito do processo de soldagem de eletrodos revestidos, normalização e instrumentação. No capítulo 3 é apresentado o desenvolvimento do trabalho indicando os materiais e os métodos adotados. No capítulo 4 são expostos os resultados experimentais, avaliando os cordões de solda obtidos com os sinais amostrados e são apresentados os resultados das classificações de padrões. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões, as relevâncias dos resultados e propostas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Será apresentada neste capítulo a revisão de literatura relacionada as áreas de conhecimento do presente trabalho.

2.1 Soldagem com eletrodos revestidos

2.1.1 Fundamentos do processo

A soldagem com eletrodos revestidos (SMAW), também conhecida como soldagem manual a arco elétrico (*Manual Metal Arc - MMA*), é um processo que ocorre por meio da união dos metais pela energia liberada durante o arco elétrico. O metal adicionado é fornecido por meio do eletrodo ao metal de base pela fusão de ambos, formando a poça de fusão. O eletrodo revestido é composto por um núcleo metálico coberto por um revestimento, de acordo com a sua classificação (Lima II; BRACARENSE, 2010).

2.1.2 Requisitos elétricos

O processo SMAW ocorre por meio do arco elétrico. Uma fonte de energia é conectada com o eletrodo por meio do porta eletrodos. O outro polo é conectado ao metal de base em série afim de se obter um arco elétrico por meio de um curto-circuito. A fonte de energia utilizada pode ser em corrente alternada (CA) ou corrente contínua (CC). A escolha da fonte dependerá dos requisitos do eletrodo; qualidade requerida da junta a ser soldada, apresentando melhores índices em circuito CC; fator de potência; e do valor de investimento (MEDEIROS, 2018). O esquema do processo de soldagem pode ser visualizado na figura 1.

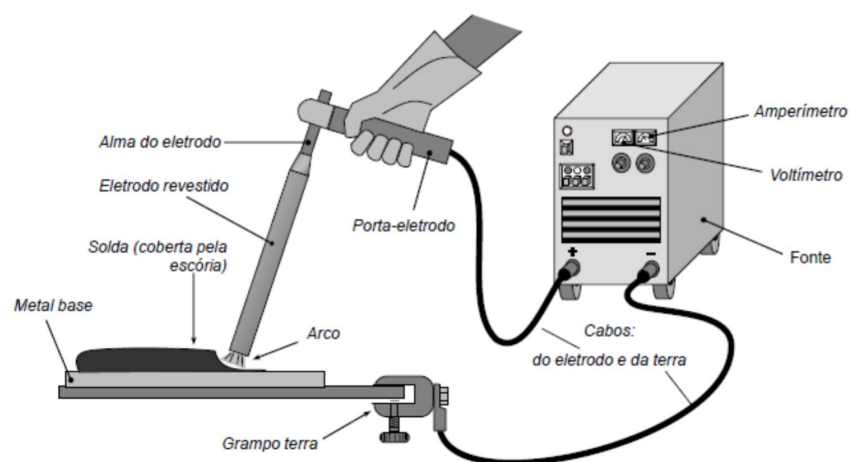


Figura 1 – Esquema processo de soldagem com eletrodo revestido.

Fonte: Medeiros (2018).

Segundo Lima II e Bracarense (2010), a qualidade da solda pode ser relacionada ao comprimento do arco, que será mensurado por intermédio de medições de tensão e corrente. O valor de tensão no eletrodo pode ser calculado a partir da equação 2.1.

$$V_{eletrodo} = \rho(T) \frac{l_{eletrodo}(t)}{A} I \quad (2.1)$$

Sendo:

$V_{eletrodo}$ tensão no eletrodo [V]

$\rho(T)$ resistividade elétrica do eletrodo em função da temperatura [$\Omega.m$]

$l_{eletrodo}(t)$ comprimento do eletrodo não derretido [m]

A área do eletrodo [m^2]

I corrente de solda [A]

Um dos empecilhos do controle da tensão dá-se ao fato de que o comprimento do eletrodo não é constante, visto que seu tamanho diminui a medida que é utilizado durante o processo de soldagem. Tal fenômeno implica na variação da resistência do eletrodo. Outro comportamento que pode comprometer o controle são as variações da resistividade elétrica do eletrodo devido ao aumento de temperatura pelo efeito Joule (KANG, 1996).

2.1.3 Eletrodo revestido

O eletrodo revestido foi desenvolvido na década de 1920 e teve avanços em sua estrutura desde então (JENNEY; O'BRIEN, 2001). O eletrodo é a peça consumível do processo de soldagem que direciona o arco e conduz a uma fusão equilibrada e uniforme.

O eletrodo revestido é constituído por um núcleo metálico (alma), revestimento com base em substâncias químicas e um extremo não revestido para servir de apoio de fixação. O núcleo metálico é a região que permite a condução de corrente. O revestimento é uma mistura concêntrica de ligantes de silicato e pó materiais como fluoretos, carbonatos, óxidos, metal ligas. Segundo Veiga (2011), essa cobertura tem como função proteger o arco elétrico e o metal de solda fundido; estabilizar o arco elétrico; adicionar elementos de liga ao metal de solda; criar camada protetora contra os contaminantes atmosféricos por meio da escória.

Existem diferentes tipos de eletrodos revestidos, variando de acordo com o material a ser soldado, posição de soldagem e sua aplicação. Sua classificação é feita de acordo com o tipo de consumível, propriedades mecânicas, posições de soldagem, tipo de revestimento e composição química do metal depositado (MEDEIROS, 2018). Os revestimentos podem ser do tipo oxidante, constituído principalmente de óxido de ferro e manganês; ácido, constituído essencialmente de óxido de ferro, manganês e silício; rutilico, possui grandes quantidades de óxido de titânio;

básico, contém grandes quantidades de carbonato de cálcio e fluorita; ou celulósico, utilizando material orgânico (VEIGA, 2011).

2.1.4 Vantagens e limitações do processo

Dentre as vantagens do processo SMAW, podemos citar:

- Processo de baixo investimento;
- Não há necessidade de suprimento de gases;
- Flexibilidade de aplicação;
- Eletrodos revestidos podem ser usado em todas as posições (plana, vertical, horizontal, sobre cabeça);
- Equipamentos podem ser usados também para outros processos.

Em contrapartida, o processo possui algumas desvantagens, como:

- Baixa produtividade;
- Dependente da habilidade do operador;
- Necessidade de cuidados especiais com os eletrodos;
- Volume de gases e fumos gerados no processo;

2.2 Instrumentação

Instrumentação é o campo da engenharia que estuda os instrumentos e seus princípios científicos. Esses instrumentos são utilizados para medir, indicar, transferir e/ou controlar o sistema. O monitoramento pode ser realizado de forma contínua ou discreta e são verificados dados como pressão, temperatura, nível, vazão, ph etc (DOEBELIN; MANIK, 2007). Nesse capítulo serão apresentados os conceitos de transdutores de tensão e de corrente.

2.2.1 Transdutor de tensão

De acordo com Wendling (2010), os transdutores são elementos completos, alguns já com sensor e circuito de interfaces, que captam uma determinada grandeza e transformam o sinal de forma que o dispositivo de controle consiga interpretar. Os transdutores podem ser classificados de acordo com o tipo de sinal lido, valor de saída, linearidade, alcance, velocidade de resposta etc.

Os transdutores de tensão atuam com o objetivo de captar a diferença de potencial do sistema. A medição de tensão é realizada em paralelo. Os primeiros tipos de transdutores de tensão utilizam como base o galvanômetro acoplado a uma resistência. Dessa forma, captam o campo elétrico e sua saída é um valor proporcional ao valor do divisor de tensão.

Os sensores modernos ainda se utilizam do divisor de tensão (figura 2), porém possuem dispositivos como o trimpot para maior ajuste da leitura. O divisor de tensão é uma metodologia baseada na Lei de Ohm que, a partir de uma tensão de entrada, produz valor de saída proporcional a associação dos resistores. Dessa forma, ao conectar o equipamento em paralelo com o circuito, obtém-se um valor reduzido proporcional ao do valor total do circuito.

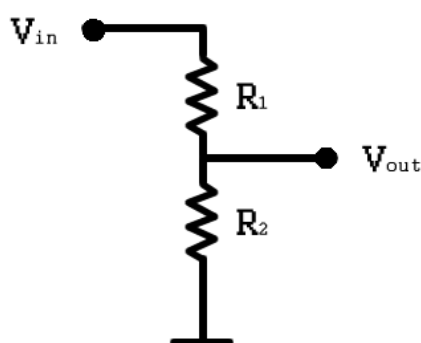


Figura 2 – Circuito divisor de tensão.

Fonte: Autora.

2.2.2 Transdutor de corrente

Os transdutores de corrente podem ser separados em 2 grupos: invasivos e não invasivos. Os transdutores de corrente invasivos são colocados em série com o circuito e realizam a leitura da corrente naquele ponto por meio da lei de Ohm. Já os não invasivos fazem a leitura baseando no campo elétrico a partir da lei da indução de Faraday.

Os transdutores de corrente não invasivos vêm ganhando destaque por se tratarem de equipamentos que não necessitam contato elétrico com o circuito. Dessa forma, é possível utilizá-los com maior praticidade e segurança. Todavia, essa técnica pode ser aplicada apenas para circuitos CA.

Os transdutores de corrente fundamentados nas leis de indução de Faraday são constituídos de espiras e são acoplados ao redor do condutor (figura 3). A corrente que flui no condutor induz campo magnético proporcional que varia ao longo do tempo. O campo magnético variante gera corrente induzida no enrolamento proporcional a sua intensidade. A corrente induzida é inversamente proporcional ao número de espiras presente no transdutor (FONTES, 2013).

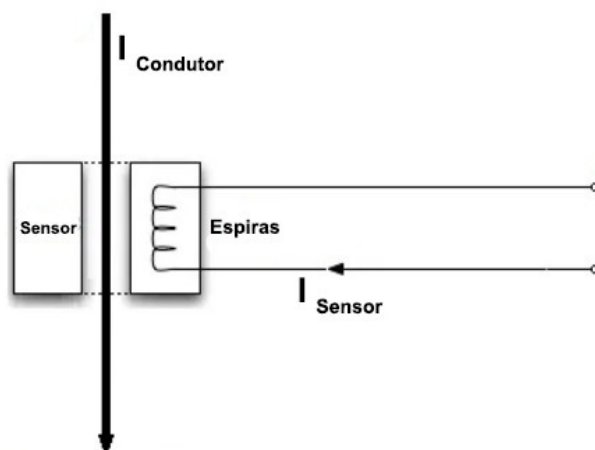


Figura 3 – Esquemático transdutor de corrente não-invasivo.

Fonte: Autora.

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo são descritos os materiais e os procedimentos metodológicos empregados na realização dos experimentos e extração dos resultados. O trabalho foi desenvolvido nas seguintes etapas:

- Realização de ensaios para definição dos requisitos dos componentes a serem utilizados no sistema de aquisição de dados;
- Desenvolvimento de sistema de aquisição de dados para amostragem dos valores de tensão e corrente;
- Realização de ensaios para aquisição das amostras;
- Verificação dos valores de tensão e de corrente obtidos e comparação com a qualidade da solda para constatar se há relação entre os valores.

3.1 Aço de baixo carbono SAE 1020

Aço de baixo carbono é uma liga constituída substancialmente de ferro e carbono, este último variando entre 0,05 e 0,20%. O aço SAE 1020 possui em torno de 0,20% de carbono e sua microestrutura é predominantemente ferrítica. Esse aço também é composto por outros elementos, como manganês, fósforo, enxofre e silício conforme tabela 1 (TAVARES, 2017).

Tabela 1 – Composição química do Aço SAE 1020

Fonte (adaptado): Tavares (2017)

Composição química				
%C	%Mn	%S	%P	%Fe
0,18 - 0,23	0,30 - 0,60	0 - 0,05	0 - 0,04	99,08 - 99,52

O aço SAE 1020, com espessura de 1/8 pol., foi escolhido em função de sua disponibilidade no mercado. A chapa de aço escolhida deve possibilitar a formação do cordão de solda e a formação das descontinuidades de perfuração e cratera.

3.2 Eletrodo revestido AWS E6013

O eletrodo revestido utilizado na execução dos cordões de solda é o AWS E6013 com diâmetro de 2,5mm. O arco proveniente deste modelo tende a ser mais estável e silencioso, a superfície do cordão mais lisa e a remoção da escória é mais fácil.

Segundo a norma ASME BPVC.II.C-2019, o revestimento do eletrodo AWS E6013 é de rutilo, celulose, ferromanganês, silicato de potássio e outros materiais siliciosos sendo recomendado para utilização em chapas metálicas. Esse tipo de material não suporta altas correntes, sendo recomendados valores entre 45 a 90A para o modelo com diâmetro de 2,5mm.

De acordo com sua nomenclatura (figura 4) baseada na norma ASME BPVC.II.C-2019, o eletrodo AWS E6013 possui resistência de tração de 60ksi; pode ser empregado em todas as posições de soldagem; seu revestimento é feito de titânio e potássio; pode ser operado com corrente alternada e contínua, com polarização direta e reversa.

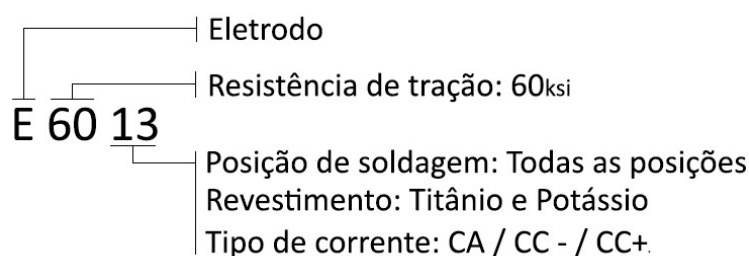


Figura 4 – Dados do eletrodo E6013 baseados em sua nomenclatura de acordo com a norma ASME BPVC.II.C-2019.

Fonte: Autora.

Os eletrodos passaram por tratamento térmico antes do uso para evitar acúmulo de umidade e não interferir na abertura e estabilidade do arco. Dessa forma, foram acondicionados em uma estufa após serem removidos da embalagem e foram retirados apenas no momento do uso.

3.3 Estação de solda

Os ensaios deste trabalho foram realizados em 2 estações de solda distintas, uma localizada no Laboratório LESTA e outra localizada no Laboratório de Controle e Automação da Fundação Gorceix.

3.3.1 Estação de solda do Laboratório LESTA

A estação de solda do laboratório LESTA utilizada nos experimentos da seção 3.6.1 consiste de um robô planar NAO-501778 de movimentação cartesiana X-Y, que dispõe de um suporte para encaixe do eletrodo acoplado a uma fonte. A fonte é convencional CA com ciclo de trabalho de 20% e possui controle de corrente por meio de núcleo móvel, permitindo a operação até 150A.

O robô é acionado utilizando um microcontrolador Arduino Mega 2560 e controlado por um *script* em Matlab 2016a. A interface gráfica desenvolvida no Matlab permite que o usuário configure as velocidades de deslocamento das juntas prismáticas do robô (figura 5).

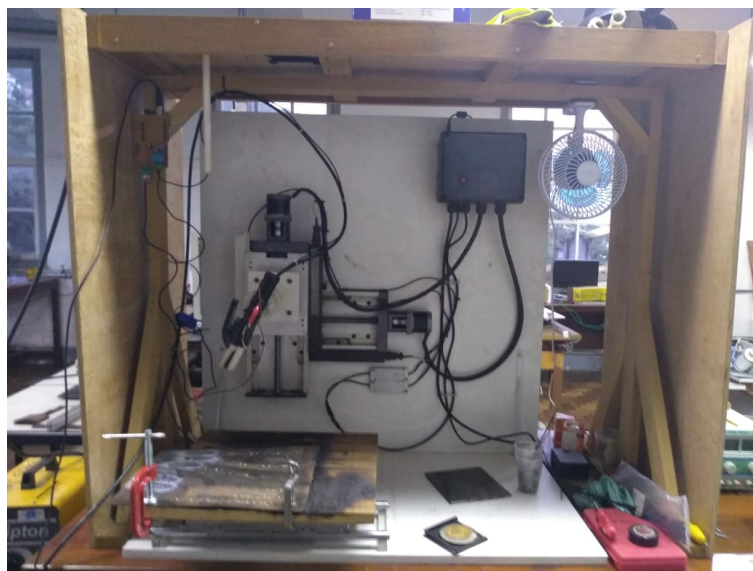


Figura 5 – Estação de soldagem robotizada presente no Laboratório LESTA.

Fonte: Autora.

3.3.2 Estação de solda do Laboratório de Controle e Automação da Fundação Gorceix

A estação de solda do laboratório de Controle e Automação da Fundação Gorceix utilizada nos experimentos da seção 3.6.2 consiste de uma fonte transformadora CA Bantam 250 Serralheiro com um porta eletrodo acoplado. De acordo com o fabricante, [ESAB \(2012\)](#), o equipamento funciona com tensão de alimentação 127/220V e corrente de saída até 250A. As especificações técnicas estão contidas na tabela 2.

Tabela 2 – Especificações técnicas da fonte transformadora Bantam 250 Serralheiro

Fonte: [ESAB \(2012\)](#).

Equipamento	Bantam 250 Serralheiro 110/220V
Tensão em circuito aberto (V)	52
Potência aparente (KVA)	11,5
Alimentação elétrica (V - Hz)	110/220 - 60
Peso (kg)	26,8
Dimensões (L x C x A) (mm)	250 x 282 x 615

3.4 Instrumentação

Foram realizados ensaios preliminares no Laboratório LESTA utilizando a estação de solda da seção 3.3.1. Foram efetuadas medições de tensão e corrente do equipamento em processo

de soldagem com auxílio de um voltímetro e um alicate amperímetro, conforme a figura 6. Os dados foram empregados para tomada de decisão dos modelos dos sensores a serem utilizados. Os dados coletados indicam que a corrente atinge um máximo de 90A (CA) e a tensão um máximo de 50V.

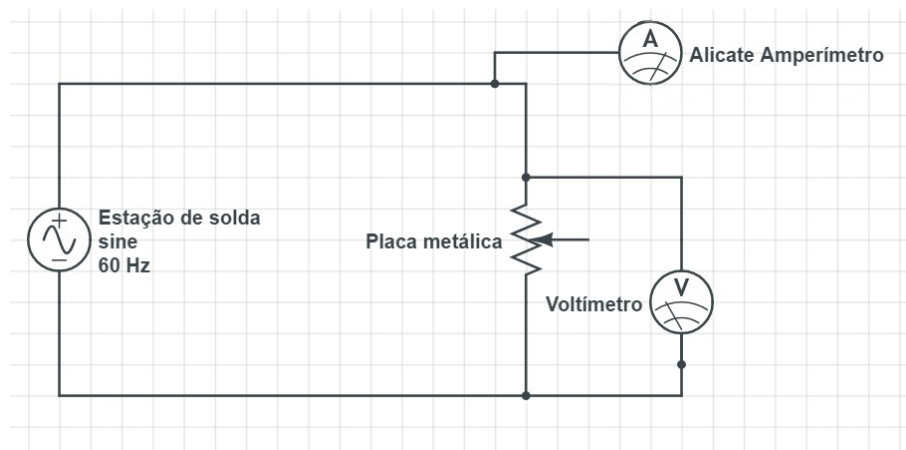


Figura 6 – Circuito de teste.

Fonte: Autora.

3.4.1 Placa de aquisição de dados

O Arduino Uno (figura 7) foi a placa de desenvolvimento utilizada para aquisição de dados. Suas portas de entrada e saída permitem comunicação com os sensores e apresentam os valores de leitura dos mesmos. Ele foi utilizado de forma a receber os dados tratados fisicamente pelos sensores SCT-013-000 e ZMPT101b e aprimorar os parâmetros via software. Além de possibilitar a visualização das leituras obtidas por meio da IDE Arduino 1.8.12.



Figura 7 – Placa Arduino Uno.

Fonte: [Arduino \(2021\)](#).

O ATmega328P da Atmel é o microprocessador do Arduino Uno e pode ser conectado diretamente a um computador e programado em linguagem baseada em C/C++. A placa possui arquitetura RISC (Reduced Instruction Set Computer) e conta com 14 pinos digitais e 6 analógicos (ARDUINO, 2021). Suas especificações técnicas estão apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 – Especificações técnicas do Arduino Uno

Fonte (adaptado): Arduino (2021).

Tensão de operação	5V
Pinos digitais I/O	14
Pinos digitais I/O com PWM	6
Pinos de entrada analógica	6
Corrente CC por pino I/O	20mA
Corrente CC no pino 3.3V	50mA
Memória flash	32kB
SRAM	2kB
EEPROM	1kB
Velocidade de Clock	16MHz
Largura	68,6mm
Altura	53,4mm
Peso	25g

3.4.2 Sensor de tensão

De acordo com Abubakar et al. (2017), o sensor de tensão utilizado, ZMPT101b, atua com leitura de tensão alternada de 0 a 250v e efetua uma conversão ADC (conversão analógico-digital) que pode ser lida por meio de uma placa de aquisição de dados. Sua tensão de alimentação é de 5 a 30V contínua, a temperatura de operação é de -40 a 70°C e possui precisão de leitura de $\pm 1\%$. Dessa forma, o sensor atende aos requisitos de tensão impostos pela estação de solda.

O sensor ZMPT101b possui duas portas de entrada, onde é realizada a leitura do sinal amostrado. Esses pinos foram conectados, um na estação de solda onde o eletrodo é energizado, e o outro na estação de solda onde está conectada a placa de metal a ser soldada. Dessa forma é possível fazer a medição da tensão em paralelo com o circuito. Os demais pinos correspondem a alimentação, aterramento e saída do sinal. O pino de saída foi conectado a placa de aquisição de dados com o intuito de enviar o sinal amostrado. O esquemático das conexões pode ser visualizado na figura 8.

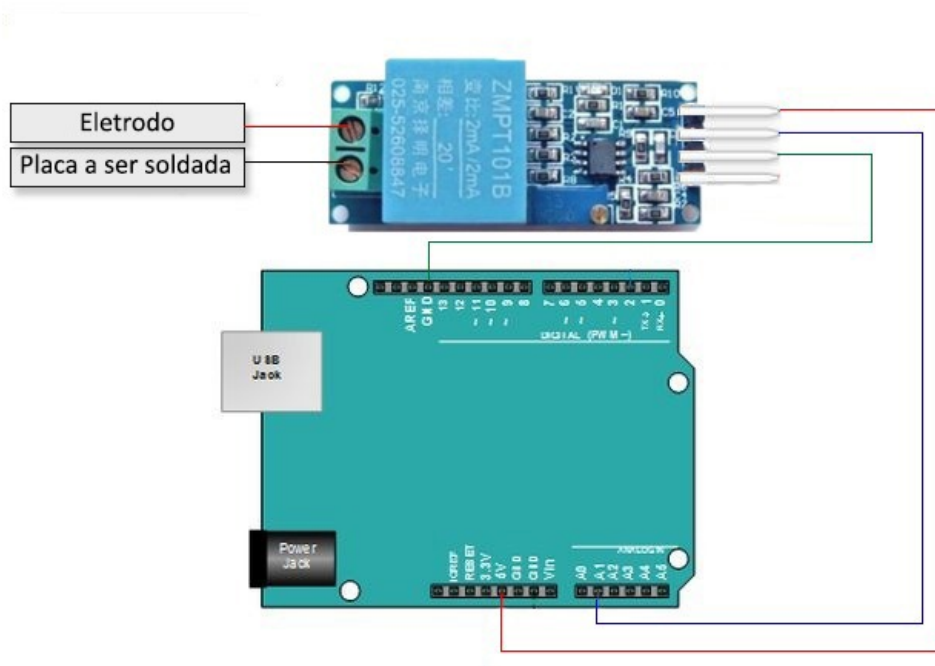


Figura 8 – Ligação do sensor de tensão ZMPT101b.

Fonte: Autora.

3.4.3 Sensor de corrente

O sensor de corrente empregado, SCT-013-000, é um transformador de corrente de núcleo dividido com faixa de operação de 0 a 100A. O dispositivo possui em seu núcleo a relação das espiras de 1:200. Assim, para leitura de sinal de 0 a 100A produz sinal proporcional de saída de 0 a 50mA. Por se tratar de medição a partir do campo elétrico, é um sensor não invasivo (DEMETRAS, 2017).

Para realizar a aquisição de dados, o SCT-013-000 foi conectado no microcontrolador Arduino Uno. Em consequência da saída do sensor ser um sinal de corrente e o Arduino Uno realizar leitura de tensão, fez-se necessário o desenvolvimento de um circuito eletrônico para transformação do sinal. O circuito foi dimensionado para leitura de corrente de 0 a 100A. Foram utilizados os valores de Corrente de Pico (I_p) ao invés dos valores em *Root Mean Square* (RMS). Assim, o valor de saída de 0 a 50mA (RMS) equivale a 0 a 70,7mA (I_p). O gráfico da figura 9 representa o sinal de saída do sensor sem nenhum tipo de tratamento externo.

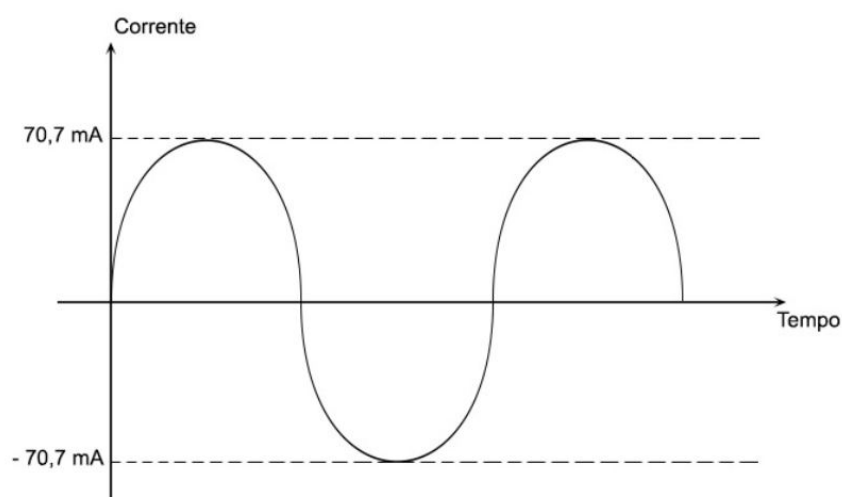


Figura 9 – Sinal de saída do sensor SCT-013-000 sem tratamento externo.

Fonte: Autora.

O circuito eletrônico foi desenvolvido utilizando um resistor, de forma que a corrente passe pelo resistor e produza um sinal de tensão associado. Como o Arduino Uno realiza a leitura apenas de 0 a 5V, foi necessário dimensionar o resistor primeiramente para o circuito ter saída de -2,5 a 2,5V, pela equação 3.1.

$$R = \frac{V_{saída}}{I} \quad (3.1)$$

Sendo:

R resistor para garantir a tensão máxima de saída do sensor, encontrado como $35,4\Omega$

$V_{saída}$ tensão máxima de saída do sensor: 2,5V

I corrente máxima na saída do sensor: 70,7mA

O valor ideal calculado do resistor é de $35,4\Omega$. Todavia, este valor não é comercial. Dessa forma, optou-se por utilizar um resistor comercial menor que o calculado para que a tensão de saída não ultrapasse 2,5V. Assim, utilizou-se o resistor comercial de 33Ω , que apresenta a resistência mais próxima do calculado. A figura 10 ilustra o gráfico referente ao sinal de saída de tensão quando aplicada a corrente no resistor.

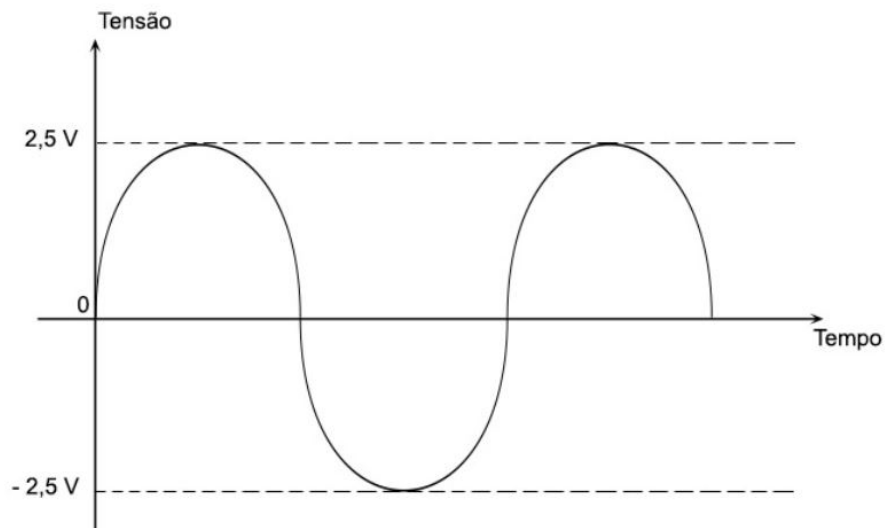


Figura 10 – Sinal de saída do sensor SCT-013-000 após implementação do circuito de transformação de sinal.

Fonte: Autora.

Em decorrência do Arduino Uno ler apenas valores positivos de tensão, foi feito um circuito de offset de 2,5V. Desse modo, a nova saída do sensor passou a ser de 0 a 5V ao invés de -2,5 a 2,5V, conforme a figura 11. Foi coletado 5V da saída do Arduino Uno e acrescentado 2 resistores de $1\text{k}\Omega$ cada de modo a configurar um divisor de tensão de 50%.

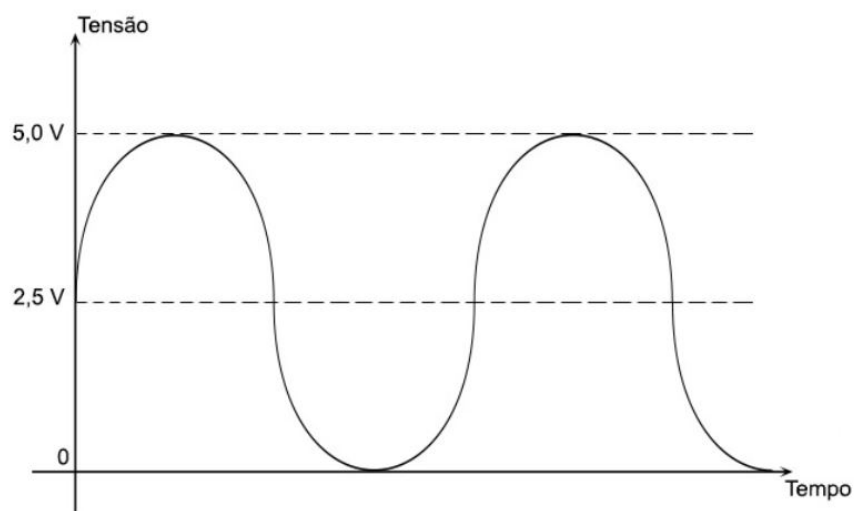


Figura 11 – Sinal de saída do sensor SCT-013-000 após implementação do circuito de transformação de sinal e circuito de offset.

Fonte: Autora.

O esquema de montagem do circuito transformador de sinal e do circuito offset está

apresentado na figura 12.

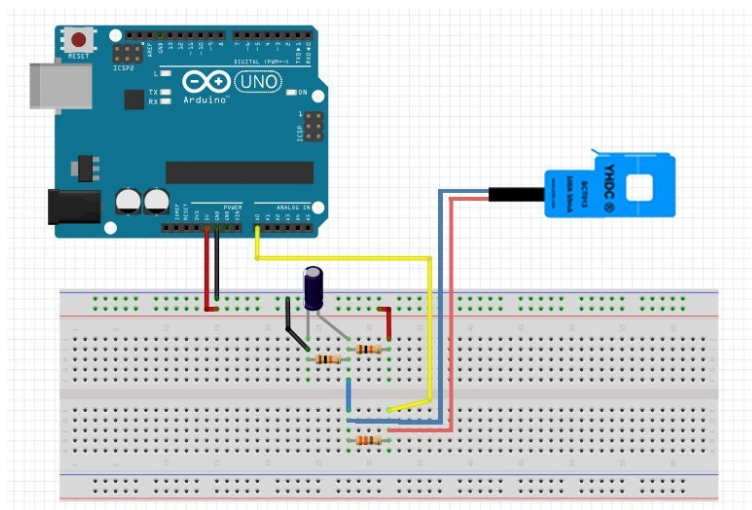


Figura 12 – Esquemático da montagem do circuito de transformação de sinal e circuito offset.

Fonte: Demetras (2017)

3.4.3.1 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados decorre na leitura dos sensores ZMPT101b e SCT-013-000 por meio do Arduino Uno. Foi desenvolvida uma placa de circuito impresso com a finalidade de realizar a comunicação entre o Arduino Uno e os sensores e o Arduino Uno com o computador.

A placa de circuito impresso foi desenvolvida de forma que permitisse as conexões do ZMPT101b com o Arduino Uno, semelhante a figura 8, e do SCT-013-000 com seu circuito transformador e de offset com o Arduino Uno, similar a figura 12. O projeto foi desenhado utilizando o programa Proteus, conforme figura 13.

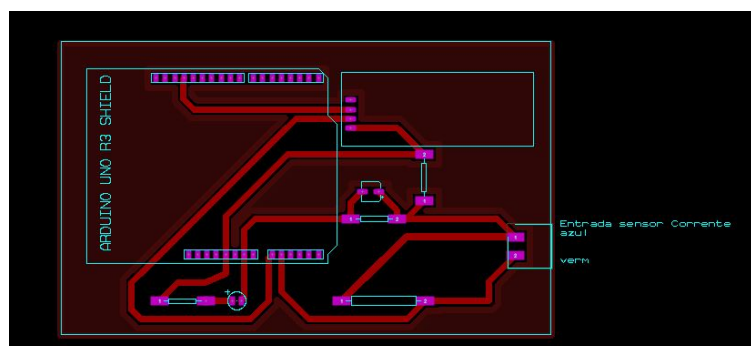


Figura 13 – Projeto da placa de circuito impresso.

Fonte: Autora.

A placa de circuito impresso foi desenvolvida artesanalmente utilizando o método fotográfico com *dry film* em uma placa de cobre para a criação das trilhas. A montagem final pode ser visualizada nas figuras 14 e 15.



Figura 14 – Placa de circuito impresso desenvolvida. Vista da frente.

Fonte: Autora.

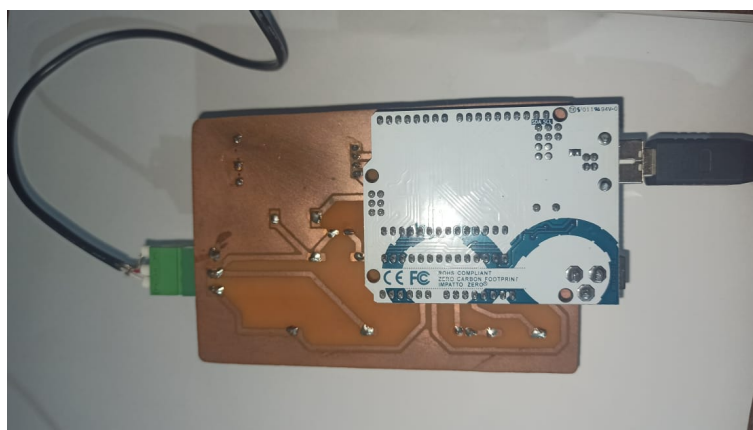


Figura 15 – Placa de circuito impresso desenvolvida. Vista da parte de trás.

Fonte: Autora.

3.5 ISO 5817

A qualificação das discontinuidades do cordão de solda foi baseada na norma ISO 5817. A norma aplica-se a qualidade de imperfeições em juntas soldadas por fusão em todos os tipos de aço, níquel, titânio e suas ligas.

A norma estabelece os níveis de imperfeições admitidas e as classificam em 3 níveis de qualidade, B, C e D. A classificação B indica alto requisito de qualidade, C médio requisito e D

baixo requisito de qualidade. A ocorrência de perfuração e de crateras não são permitidas em nenhuma das classificações.

3.6 Experimentos de soldagem

Foram realizados 2 experimentos distintos: o primeiro com a finalidade de calibrar os sensores e verificar a capacidade de indicarem o momento em que ocorre o arco elétrico; o segundo com o propósito de gerar as amostras para qualificação dos cordões.

3.6.1 Determinação do arco elétrico

Foram realizados 6 ensaios de soldagem no Laboratório LESTA com a estação de solda descrita na seção 3.3.1. O intuito foi ajustar os parâmetros de calibração dos sensores e verificar se são capazes de indicar com exatidão o momento no qual ocorre o arco elétrico.

Cada ensaio foi realizado com um ângulo de 25° no modo puxando a poça de fusão. Ao início de cada ensaio foi feito o arco elétrico manualmente aproximando o eletrodo à peça a ser soldada. Depois da constatação visual, as juntas prismáticas do robô planar eram acionadas horizontalmente a uma velocidade constante de 2,52mm/s. Quando o arco extinguiu-se, era enviado um comando e o robô encerrava o movimento, findando o ensaio.

Foram acoplados ao sistema um multímetro e um alicate amperímetro para verificar os valores de tensão e corrente durante o processo de soldagem. Foram feitas filmagens das telas dos equipamentos para posterior comparação com os dados amostrados pelo sistema de aquisição de dados desenvolvido. Os sensores coletaram os dados com intervalo de amostragem em torno de 500ms e foram comparados com os dados dos equipamentos.

Cada um dos ensaios resultou em 1 cordão, dispostos na figura 16. Ao final dos ensaios, a placa recebeu tratamento de acabamento. Evidenciou-se que os cordões possuíam comprimentos distintos, observados na tabela 4. Isso ocorreu devido ao robô operar em malha aberta sem fiel controle de posição, onde a gravidade influenciou na velocidade final de movimento.

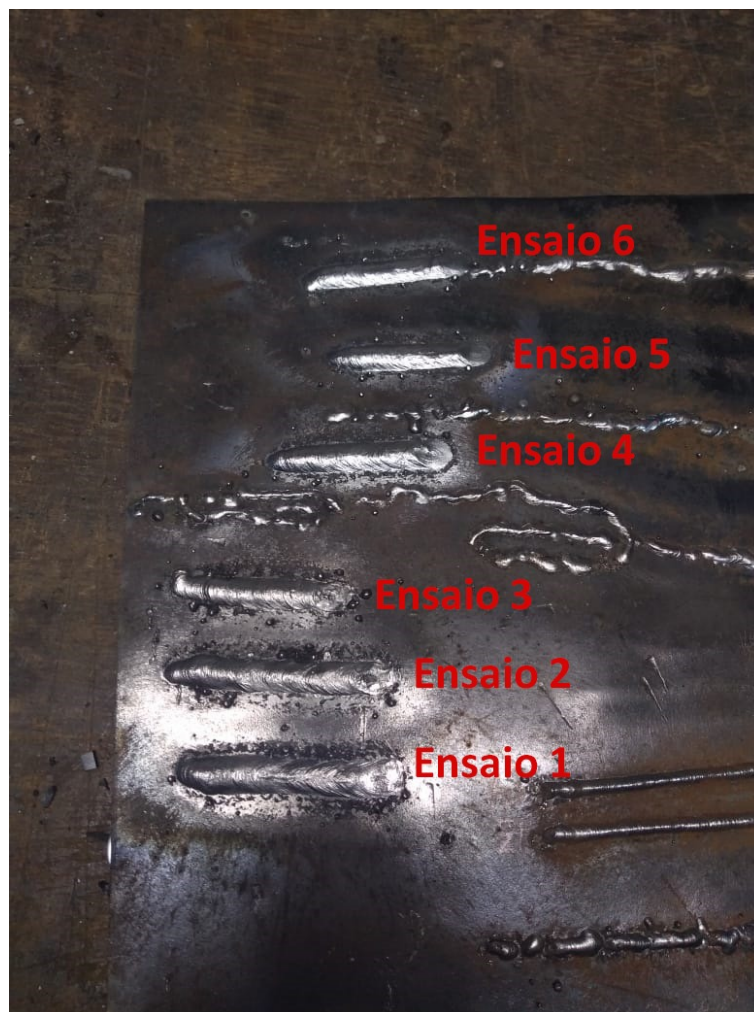


Figura 16 – Chapa com os cordões dos ensaios 1 a 6.

Fonte: Autora.

Tabela 4 – Relação entre comprimento do cordão, corrente máxima e tensão mínima de cada ensaio

	Comprimento do cordão [mm]	Corrente máxima [A]	Tensão mínima [V]
Ensaio 1	6,44	89,8	15,5
Ensaio 2	6,71	79,2	10,2
Ensaio 3	5,54	83,1	20
Ensaio 4	5,09	89,2	16,1
Ensaio 5	5,54	78,9	9,7
Ensaio 6	5,91	75,5	21,3

Foi observado que a tensão reduz seu valor durante o processo de soldagem, tendo como média do valor mínimo de cada ensaio 15,47V, representando cerca de 30% do valor inicial. A média dos valores máximos de corrente foi de 82,82A. Também foi verificado que os valores de tensão diminuem quando a corrente aumenta, porém não foi evidenciada proporcionalidade.

Durante a tentativa de arco-elétrico, ocorreram picos de corrente, porém o arco não havia iniciado. No ensaio 3 (figura 17), houveram picos nos instantes 500, 3500 e 4500ms, porém o arco iniciou apenas no instante 7000ms. Dessa forma, evidencia-se a capacidade do sistema de aquisição de dados de realizar a leitura e armazenamento dos sinais.

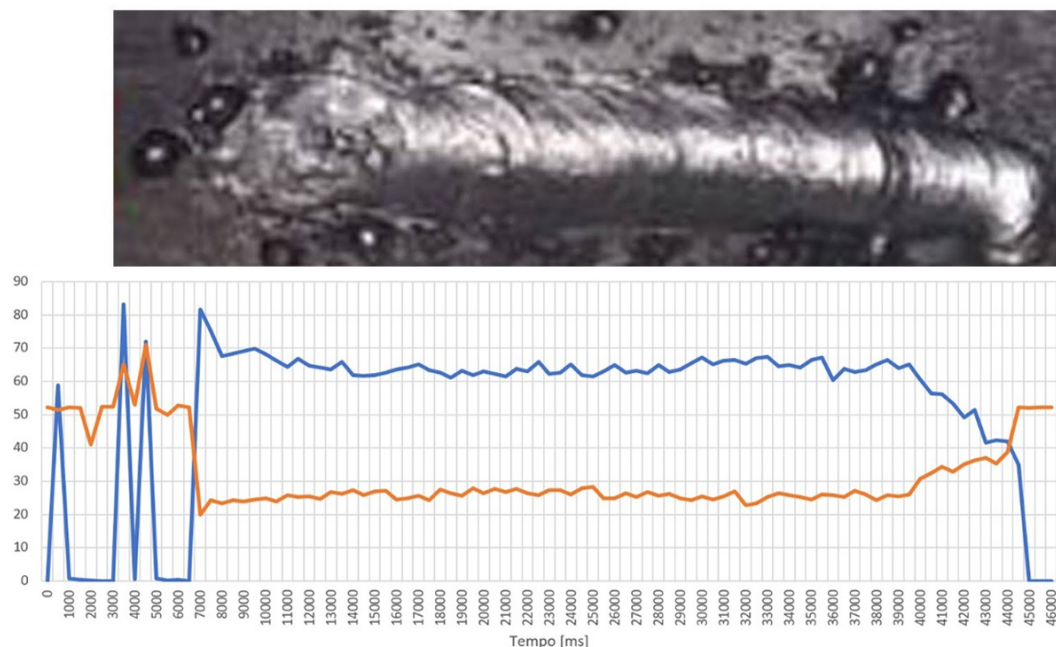


Figura 17 – Cordão de solda do ensaio 3, com o valor de corrente (A) representado em azul e o valor de tensão (V) representado em laranja.

Fonte: Autora.

Os sensores demonstraram-se eficientes para indicar o momento da ocorrência e da finalização do arco-elétrico. É possível encontrar os valores de tensão e corrente associados ao cordão, porém verificou-se a necessidade de manter o tempo de amostragem fixo para realização das análises.

3.6.2 Soldagem para qualificação do cordão de solda

Por conta das restrições ocorridas na pandemia do Covid19, não foi possível o acesso ao Laboratório LESTA. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Automação e Controle da Fundação Gorceix utilizando a estação de solda manual da seção 3.3.2.

Foram realizados 23 ensaios resultando em 22 cordões de solda, sendo que o ensaio 17 não formou arco elétrico. Dentre os 22 cordões, houveram outros erros, optando pelo descarte dos cordões 2, 7 e 10. Durante cada ensaio, os dados foram lidos e tratados com amostragem de 100ms.

Os ensaios foram realizados em uma chapa de aço SAE 1020 de 1/8 pol. (3,175mm) de espessura e dimensão de 50x30cm. Os cordões que apresentam descontinuidade de perfuração foram obtidos intencionalmente com o operador mantendo o eletrodo por mais tempo no mesmo ponto. A placa está sujeita a alterações em suas propriedades físicas durante o procedimento de solda, ocorrendo dilatação por conta do calor. Para minimizar esse efeito nas amostras, os cordões foram feitos de forma a intercalar entre um cordão sem perfuração e um com perfuração. O tipo do cordão foi repetido quando notou-se a necessidade de descartar o cordão anterior. Ao final dos experimentos, a placa recebeu tratamento de acabamento (figura 18).



Figura 18 – Chapa com os cordões dos ensaios 1 a 23.

Fonte: Autora.

3.7 Segmentação dos dados

Os dados dos ensaios foram obtidos via IDE Arduino 1.8.12 em um computador pessoal com Intel Core I5-7300HQ, de 2,5GHz, 24GB de memória RAM com o sistema operacional Windows 10 Pro. A análise e plotagem dos gráficos foi realizada utilizando o software Excel

2019.

Os dados recebidos incluem os valores de tensão e corrente desde as tentativas iniciais de arco elétrico até depois do arco já ter se extinguido (figura 19). Esses dados foram tratados de forma a apresentarem valores apenas enquanto estivesse ocorrendo o arco elétrico, onde a soldagem efetivamente acontece (figura 20).

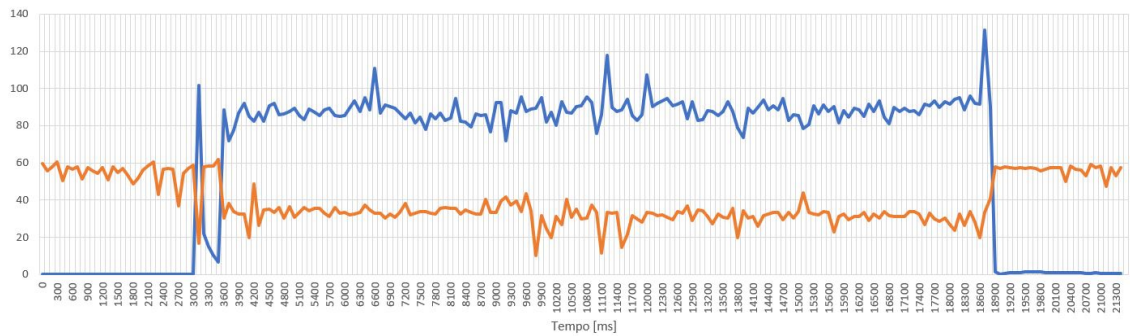


Figura 19 – Dados completos do ensaio 1, com o valor de corrente (A) representado em azul e o valor de tensão (V) representado em laranja.

Fonte: Autora.

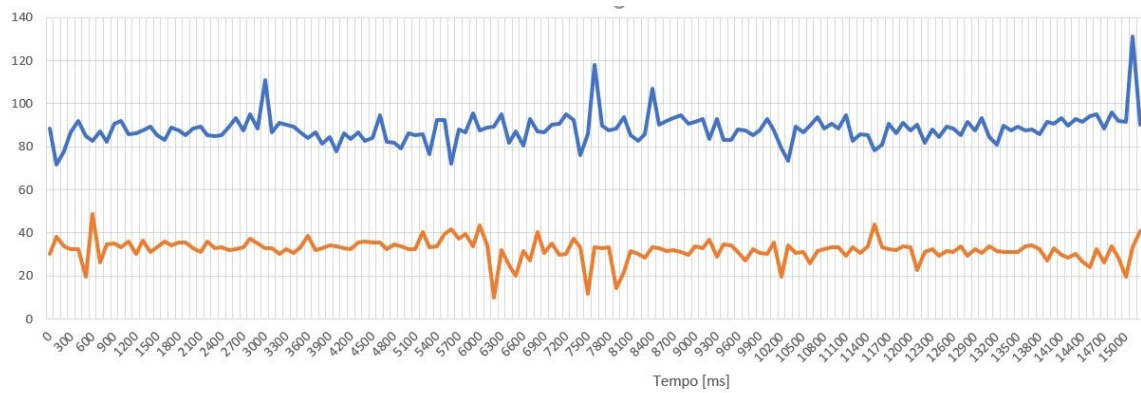


Figura 20 – Dados segmentados do ensaio 1, com o valor de corrente (A) representado em azul e o valor de tensão (V) representado em laranja.

Fonte: Autora.

4 RESULTADOS

Após a realização dos ensaios, obteve-se 19 cordões de solda, efetuados manualmente, com comprimentos entre 67,7mm e 95,5mm, com média de 78,9mm. Os valores de corrente máxima e tensão mínima entre os 2 tipos de cordões foram próximos, com médias de 128A e 8,3V, conforme tabela 5.

Tabela 5 – Relação entre comprimento, corrente máxima, tensão mínima e presença da descontinuidade de perfuração em cada cordão.

Cordão	Comprimento [mm]	Corrente Máxima [A]	Tensão mínima [V]	Perfuração
1	95,5	131,3	10,1	Não
3	73,4	124,9	9,3	Sim
4	83,4	121,4	7,5	Não
5	89,5	122,4	6,2	Sim
6	89,0	132,9	6,6	Não
8	83,1	125,9	7,6	Sim
9	76,8	128,1	6,8	Não
11	76,6	132,1	7,5	Sim
12	76,5	130,5	9,2	Não
13	79,3	133,7	7,2	Sim
14	81,4	135,0	9,4	Não
15	71,3	124,2	9,1	Sim
16	72,9	131,6	9,8	Não
18	67,7	124,6	9,3	Sim
19	79,0	127,8	7,4	Não
20	83,6	128,2	9,7	Sim
21	78,6	130,1	7,4	Não
22	71,3	128,2	8,0	Sim
23	72,0	132,1	10,2	Não

Com o objetivo de padronizar a localização das perfurações, houve tentativa de centralizá-las nos cordões. As distâncias de perfuração foram medidas a partir do início do cordão até o ponto em que se inicia a perfuração. Foram obtidas perfurações de diferentes larguras, conforme tabela 6. As diferenças ocorreram por se tratar de soldagem manual.

Tabela 6 – Dados das perfurações

Cordão	Largura da perfuração [mm]	Distância da perfuração [mm]
3	3,0	38,3
5	5,0	52,8
8	7,3	44,9
11	5,5	40,0
13	7,0	42,0
15	8,9	38,8
18	6,9	33,2
20	6,1	41,2
22	4,6	36,8

Após comparar visualmente os valores de tensão e corrente com os respectivos cordões, foram detectados distúrbios no valor de corrente quando ocorreram as discontinuidades de perfuração e de cratera.

Nas figuras 21, 22 e 23 observa-se a redução da corrente quando ocorre a descontinuidade de perfuração. Nota-se também pequenos picos de tensão, porém os mesmos também ocorrem fora da descontinuidade analisada.

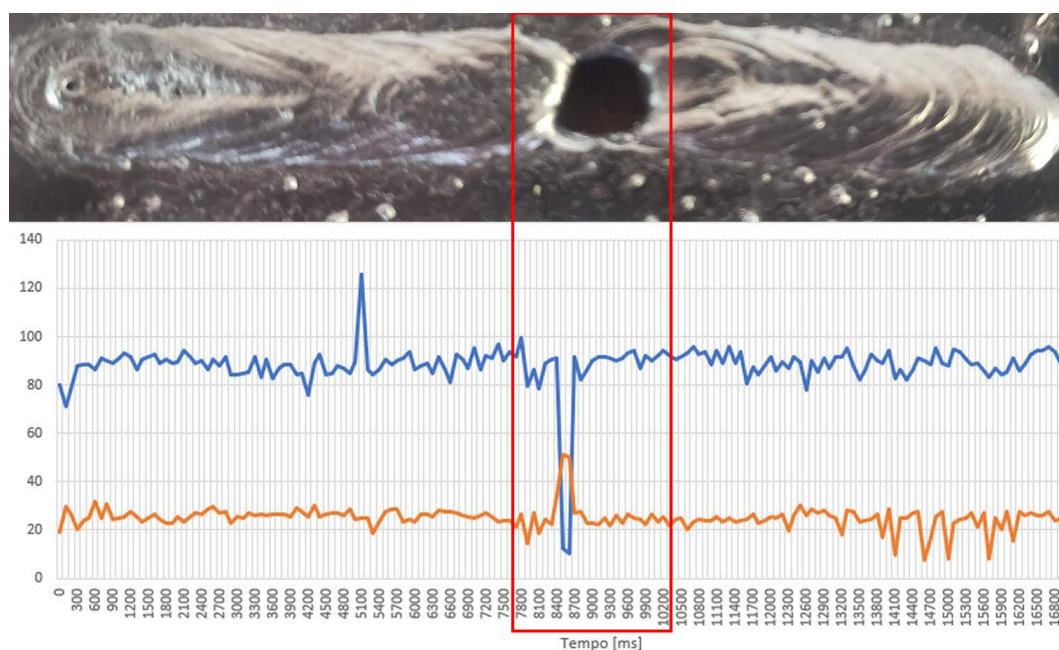


Figura 21 – Cordão de solda 8 com a descontinuidade de perfuração, indicada em vermelho, com o valor de corrente (A) representado em azul e o valor de tensão (V) representado em laranja.

Fonte: Autora.

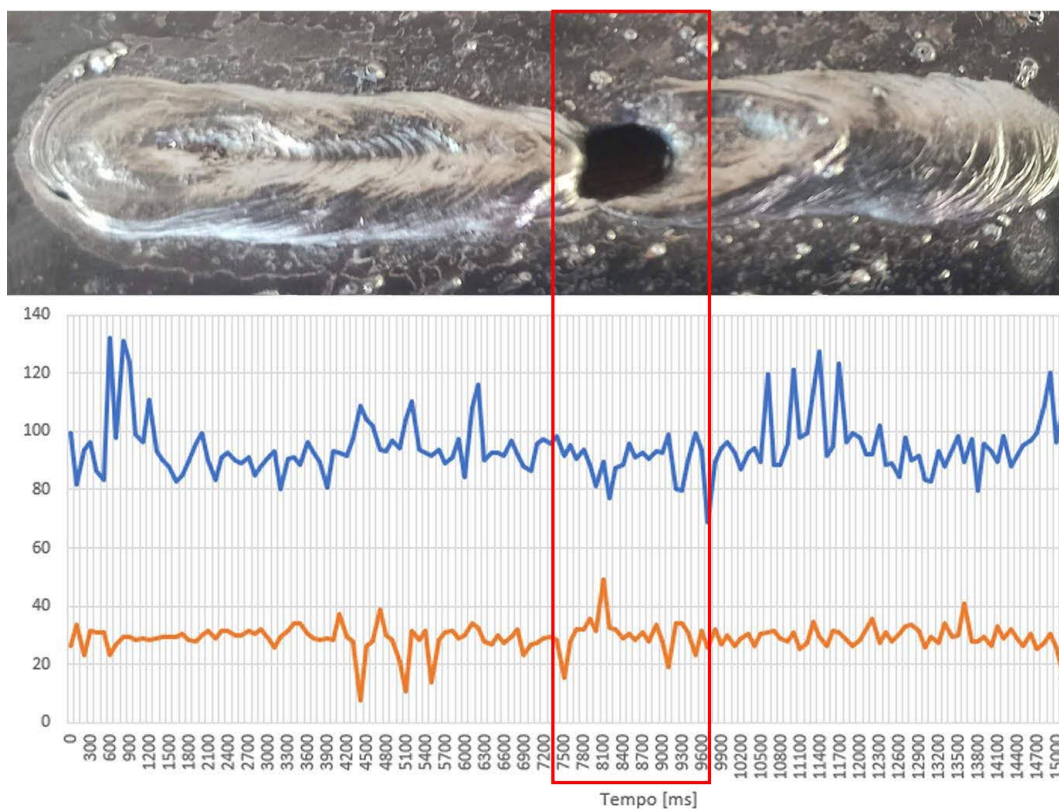


Figura 22 – Cordão de solda 11 com a descontinuidade de perfuração, indicada em vermelho, com o valor de corrente (A) representado em azul e o valor de tensão (V) representado em laranja.

Fonte: Autora.

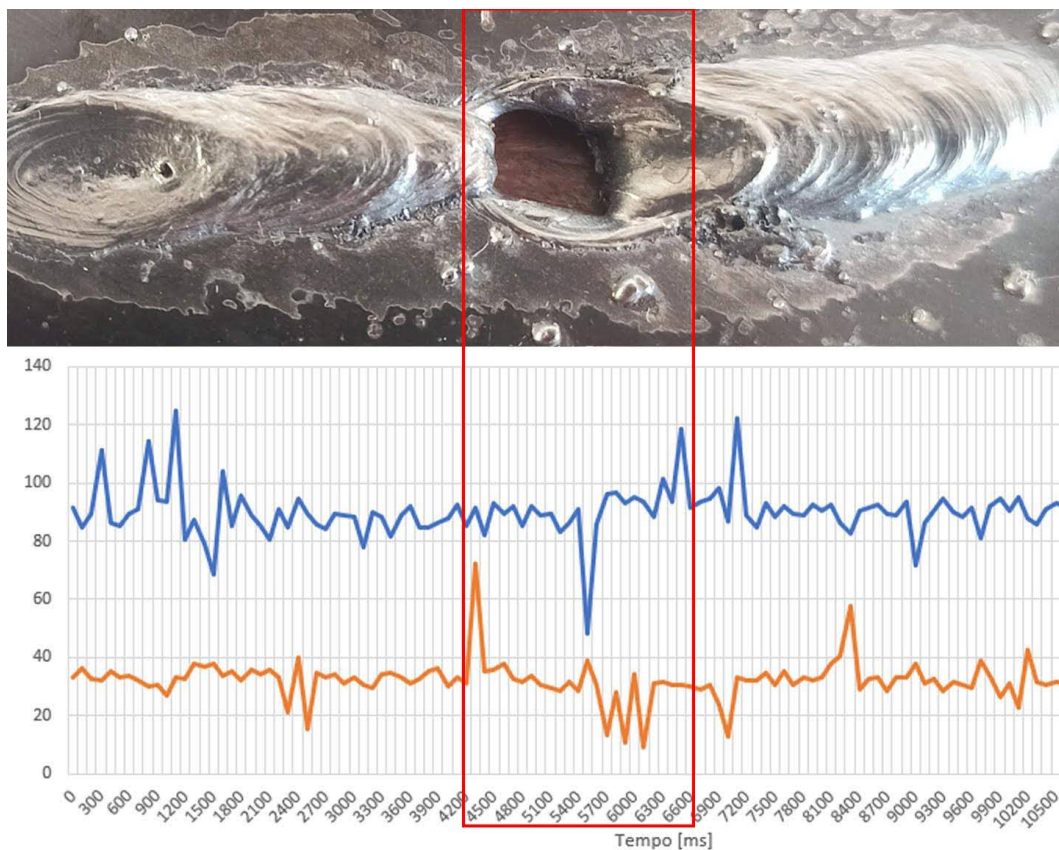


Figura 23 – Cordão de solda 18 com a descontinuidade de perfuração, indicada em vermelho, com o valor de corrente (A) representado em azul e o valor de tensão (V) representado em laranja.

Fonte: Autora.

Nas figuras 24, 25 e 26 observa-se picos na corrente quando ocorre a descontinuidade de cratera. Não foram constatadas variações visualmente significativas de tensão.

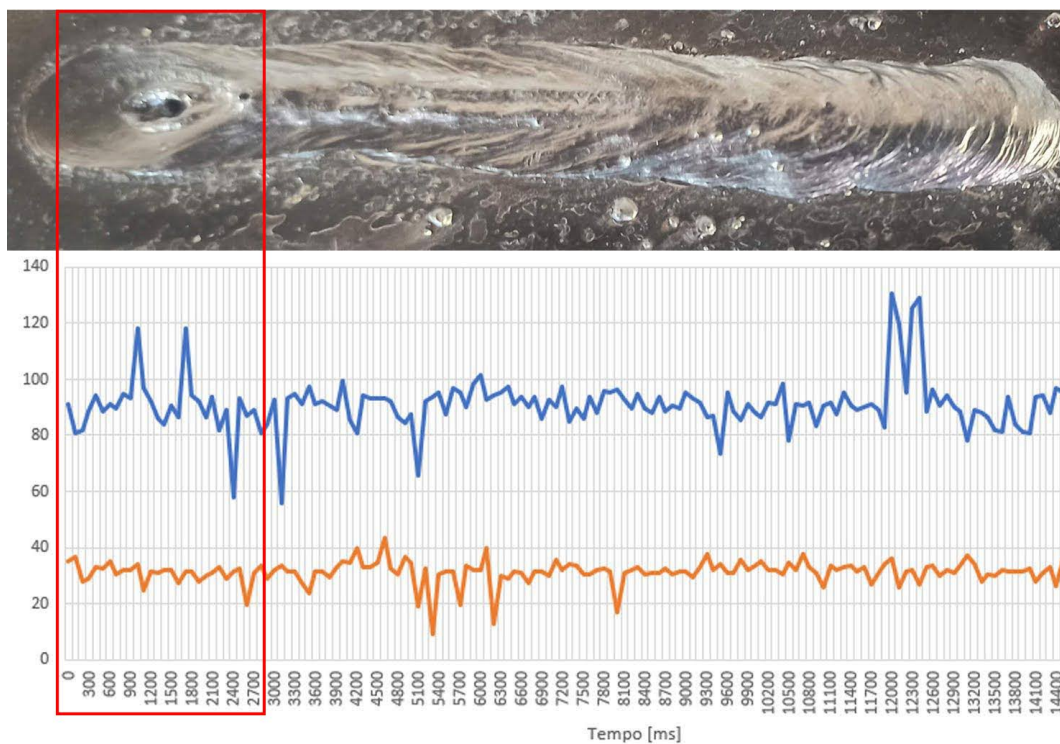


Figura 24 – Cordão de solda 12 com a descontinuidade de cratera, indicada em vermelho, com o valor de corrente (A) representado em azul e o valor de tensão (V) representado em laranja.

Fonte: Autora.

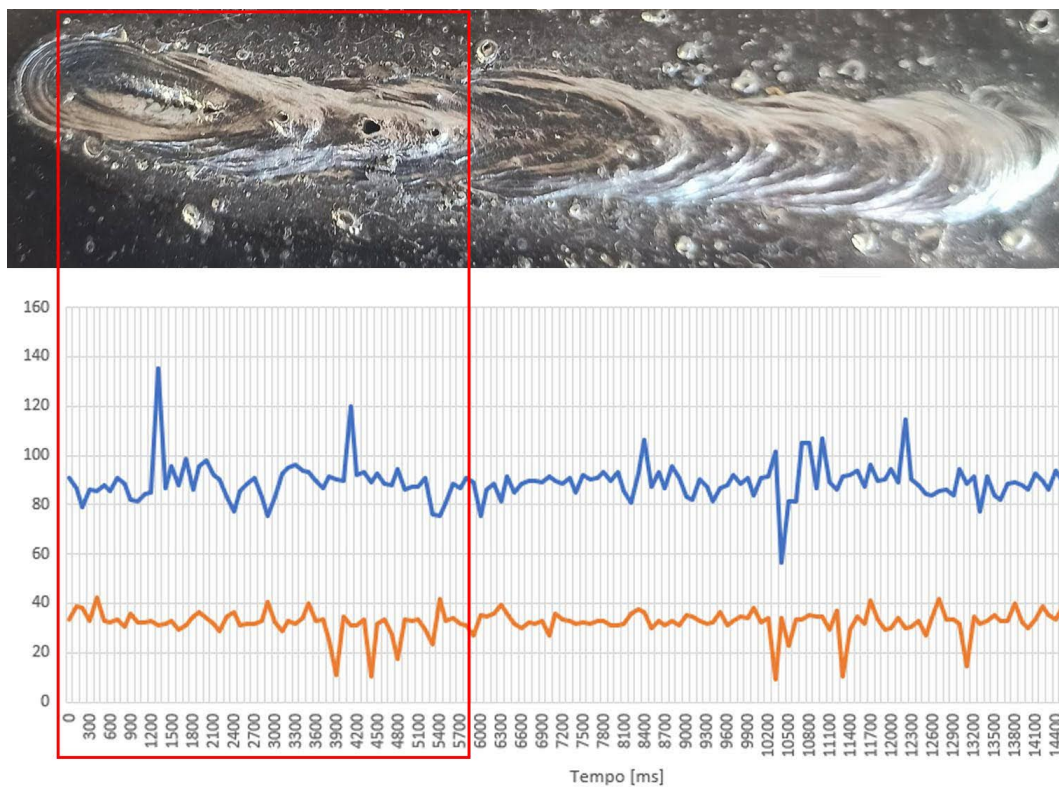


Figura 25 – Cordão de solda 14 com a descontinuidade de cratera, indicada em vermelho, com o valor de corrente (A) representado em azul e o valor de tensão (V) representado em laranja.

Fonte: Autora.

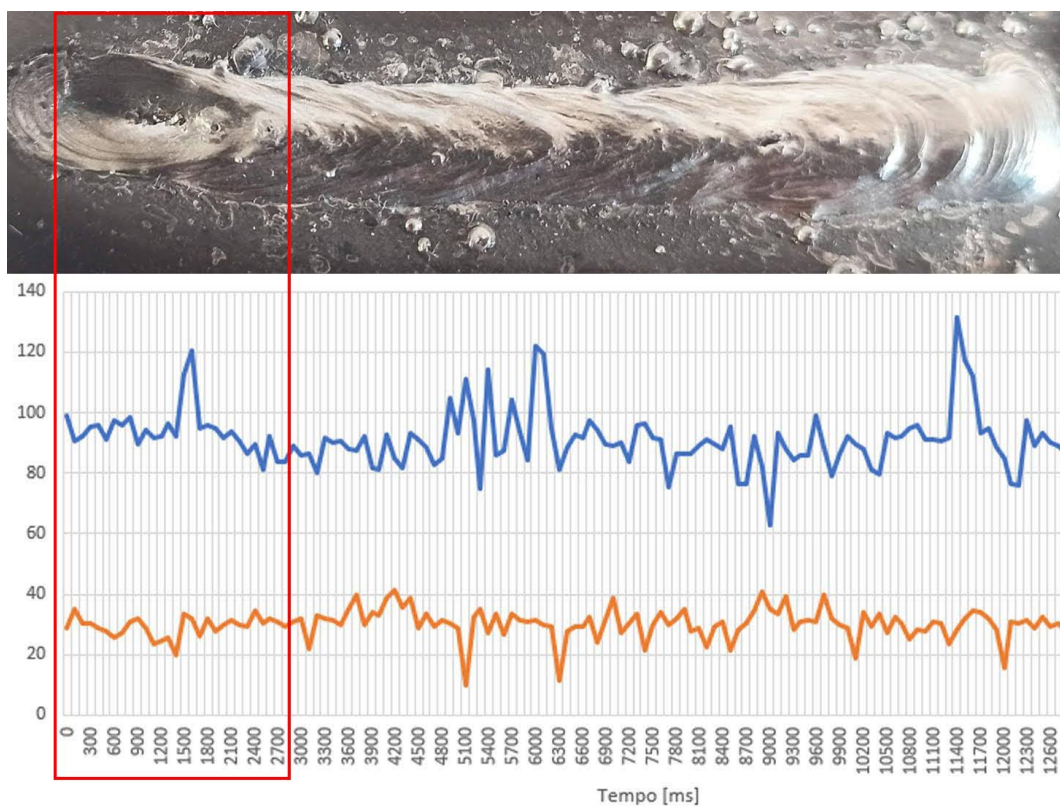


Figura 26 – Cordão de solda 16 com a descontinuidade de cratera, indicada em vermelho, com o valor de corrente (A) representado em azul e o valor de tensão (V) representado em laranja.

Fonte: Autora.

Os cordões das figuras 27, 28 e 29 foram classificados como normais.

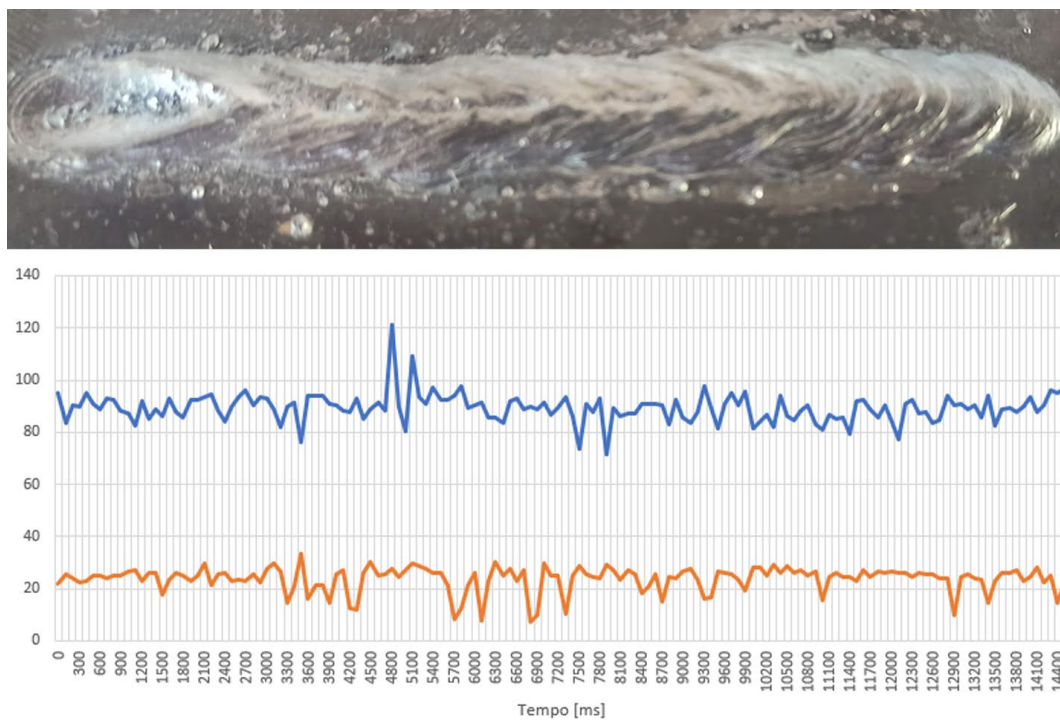


Figura 27 – Cordão de solda 4 classificado como normal, com o valor de corrente (A) representado em azul e o valor de tensão (V) representado em laranja.

Fonte: Autora.

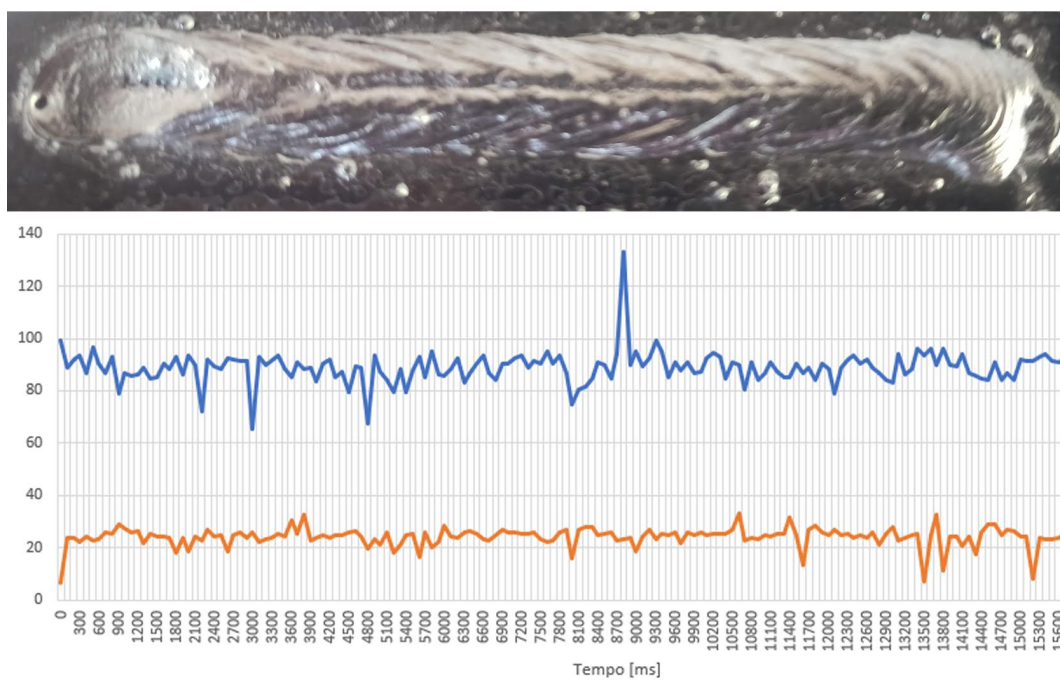


Figura 28 – Cordão de solda 6 classificado como normal, com o valor de corrente (A) representado em azul e o valor de tensão (V) representado em laranja.

Fonte: Autora.

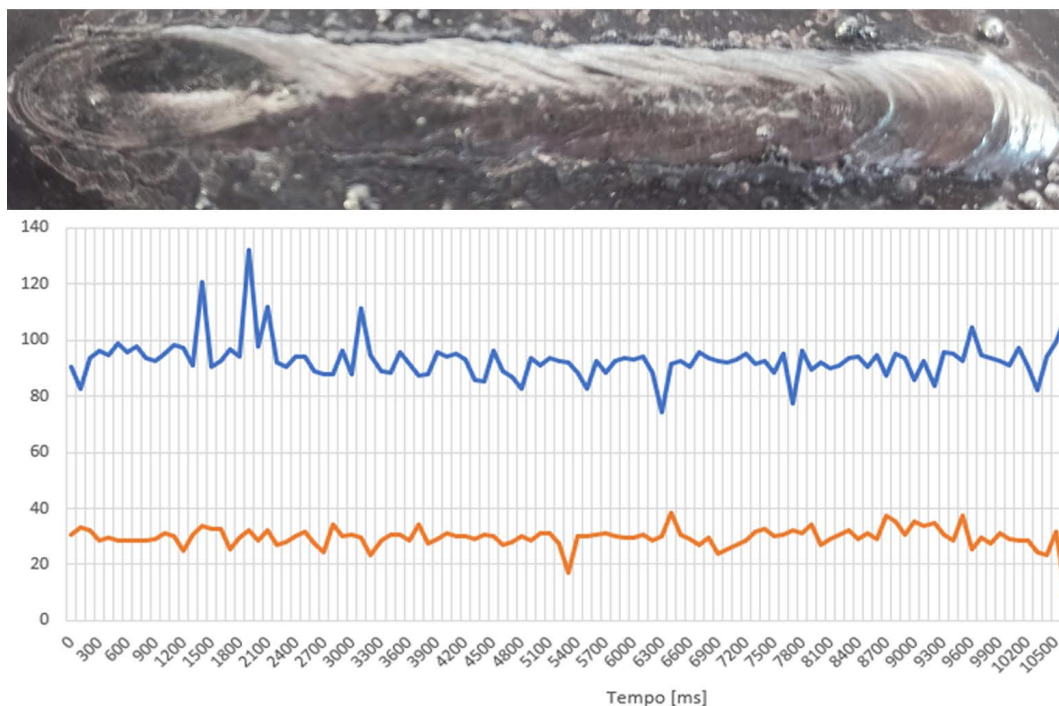


Figura 29 – Cordão de solda 23 classificado como normal, com o valor de corrente (A) representado em azul e o valor de tensão (V) representado em laranja.

Fonte: Autora.

Os dados de corrente comprovaram viabilidade para detecção de descontinuidades de perfuração e de cratera. Contudo, recomenda-se uso de técnicas computacionais para análise dos dados, como ferramentas de *Machine Learning*. Os dados de tensão não demonstraram ser suficientes para detecção de descontinuidades de perfuração e de cratera. Para uma melhor análise é necessário controlar o comprimento do cordão de solda, bem como a velocidade de sua deposição.

Os movimentos manuais de aproximação e repulsão do eletrodo com o metal base realizados pelo soldador geram distorção nos dados, que dificultam sua análise para qualificação do cordão de solda.

5 CONCLUSÃO

O trabalho realizado agregou conhecimento na área de engenharia e contribuiu para a estação de soldagem SMAW robotizada presente no Laboratório LESTA. O sistema de aquisição de dados demonstrou viabilidade para sinalizar o momento de início e fim do arco-elétrico. Dessa forma, o presente trabalho poderá ser utilizado para comandar o início e o fim do movimento do robô para a execução do cordão de solda.

A leitura dos sinais de corrente e de tensão mostraram-se viáveis para detectar as discontinuidades de perfuração e de cratera, conforme descrito na literatura. Verificou-se que na soldagem manual a variação da tensão durante a execução do cordão de solda foi maior do que na soldagem robotizada, uma vez que no processo de soldagem manual não há o controle do comprimento do arco e da velocidade de deposição do cordão de solda. Sugere-se aplicar técnicas computacionais para classificar as discontinuidades.

Em decorrência das restrições impostas na pandemia do Covid19, os experimentos foram limitados. Não foi possível otimizar os parâmetros do processo para a estação de solda robotizada. Portanto, não foi possível alcançar todos os objetivos propostos.

Para trabalhos futuros sugere-se: executar novos ensaios com a estação de solda robotizada; aplicar técnicas de *Machine Learning* para classificação dos dados; implementar um sistema automático para a execução do cordão de solda com base nas amostragem de tensão e de corrente em função da abertura e estabelecimento do arco elétrico.

REFERÊNCIAS

- ABUBAKAR, I. et al. Calibration of ZMPT101B voltage sensor module using polynomial regression for accurate load monitoring. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017. v. 12, n. 4, p. 1076–1084, 2017. ISSN 18196608. Citado na página 27.
- ALFARO, S. C. A. Sensors for quality control in welding. *Soldagem & Inspeção*, 2012. v. 17, n. 3, p. 192–200, 2012. ISSN 1980-6973. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- ARDUINO. *Arduino UNO REV3*. 2021. Disponível em: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>. Acesso em: 24/03/2021. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- BROERING, C.; DUTRA, J.; JÚNIOR, R. Desenvolvimento De Dispositivo Para a Automação Da Soldagem De Reservatórios. *3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás*, 2004. n. 3, p. 4, 2004. Citado na página 16.
- CAWLEY, P. Non-destructive testing — current capabilities and. *Materials: Design and Applications*, 2001. v. 215, n. 4, p. 213–223, 2001. ISSN 14644207. Citado na página 14.
- Cocota Jr., J. A. N. *Detecção de descontinuidades no processo de soldagem por eletrodo revestido por meio de inteligência computacional*. 2017. Tese apresentada em cumprimento parcial dos requisitos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT para o grau de Doutor em Engenharia de Materiais. Ouro Preto. Citado na página 17.
- Cocota Jr., J. A. N. et al. Discontinuity detection in the shield metal arc welding process. *Sensors (Switzerland)*, 2017. v. 17, n. 5, p. 1–14, 2017. ISSN 14248220. Citado na página 15.
- DEMETRAS, E. *SCT-013 – Sensor de Corrente Alternada com Arduino*. 2017. Disponível em: https://portal.vidadesilicio.com.br/sct-013-sensor-de-corrente-alternada/#Sensor_de_corrente_nao_invasivo_SCT-013. Acesso em: 05/12/2018. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 31.
- DOEBELIN, E. O.; MANIK, D. N. *Measurement systems: application and design*. [S.l.]: McGraw-Hill, 2007. ISBN 9780070616721. Citado na página 20.
- ESAB. *Manual Bantam 250 serralheiro 110/220V*. 2012. Disponível em: https://www.esab.com.br/br/pt/support/documentation/upload/0208426_rev14_bantamserralheiro250_pt.pdf. Acesso em: 11/04/2021. Citado na página 25.
- FERNANDES, L.; MELO, R. S. Aplicação da Técnica de Planejamento Fatorial na Síntese da 1,5-difenil-(E,E)-1,4-pentadien-3-ona (dibenzalcetona). 2017. v. 4, n. January, p. 17–21, 2017. Citado na página 15.
- FONTES, M. J. d. C. *Automação de sensores de corrente elétrica*. 2013. Monografia apresentada em cumprimento parcial dos requisitos do Centro Universitário de Brasília para o grau de Bacharel em Engenharia de Computação. Brasília: Centro Universitário de Brasília. Citado na página 21.

- HALL, B. Facies classification using machine learning. *Leading Edge*, 2016. v. 35, n. 10, p. 906–909, 2016. ISSN 19383789. Citado na página 15.
- JENNEY, C.; O'BRIEN, A. *Welding Handbook, Welding Science & Technology*. 9. ed. [S.l.: s.n.], 2001. 985 p. ISBN 0871716577. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 19.
- KANG, D. *Development of an arc voltage control mechanism for underwater wet smaw process*. 103 p. Tese (Doutorado) — The Ohio State University, 1996. Citado 4 vezes nas páginas 14, 15, 16 e 19.
- Lima II, E. J.; BRACARENSE, A. Q. Robotic shielded metal arc welding. *Welding Journal (Miami, Fla)*, 2010. v. 89, n. 8, 2010. ISSN 00432296. Citado 4 vezes nas páginas 14, 16, 18 e 19.
- MEDEIROS, V. S. *Determinação dos parâmetros de soldagem mais adequados para união de tubos de parede fina pelo processo de eletrodo revestido*. 2018. Monografia apresentada em cumprimento parcial dos requisitos da Universidade Federal de Uberlândia para o grau de Bacharel em Engenharia Mecânica. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- OKUYAMA, M. P. et al. Engenharia de usabilidade aplicada no desenvolvimento de um sistema interativo para soldagem robotizada. *Soldagem e Inspecao*, 2012. v. 17, n. 4, p. 288–297, 2012. ISSN 01049224. Citado na página 16.
- SILVA, G. C. et al. Comparing two different arc welding processes through the welding energy: a selection analysis based on quality and energy consumption. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019. Springer Berlin Heidelberg, v. 41, n. 7, p. 1–12, 2019. ISSN 18063691. Citado na página 15.
- SILVA, M. M. da et al. Otimização de parâmetros do processo de soldagem arco submerso para revestimentos anticorrosivos. *Soldagem e Inspecao*, 2016. v. 21, n. 1, p. 115–124, 2016. ISSN 19806973. Citado na página 15.
- SUMESH, A. et al. Use of machine learning algorithms for weld quality monitoring using acoustic signature. *Procedia Computer Science*, 2015. Elsevier Masson SAS, v. 50, p. 316–322, 2015. ISSN 18770509. Citado na página 15.
- TAVARES, S. S. *Soldagem por fricção convencional entre a liga de alumínio 6351-T6 e o aço SAE 1020 assistida por indução eletromagnética*. 2017. Dissertação apresentada em cumprimento parcial dos requisitos da Universidade Federal de Minas Gerais para o grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais. Citado na página 23.
- VEIGA, B. H. *Composição, fabricação e análise de eletrodo revestido*. 2011. Monografia apresentada em cumprimento parcial dos requisitos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para o grau de Bacharel em Engenharia Mecânica. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- WAINER, E.; BRANDI, S.; MELLO, F. de. *Soldagem: processos e metalurgia*. [S.l.]: Editora Blucher, 1992. ISBN 9788521216759. Citado na página 14.
- WENDLING, M. Sensores. *Universidade Estadual Paulista. São Paulo*, 2010. v. 2010, p. 20, 2010. Citado na página 20.