



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**INFLUÊNCIA DA TENSÃO ELÉTRICA NA TRANSFERÊNCIA POR  
CURTO CIRCUITO NA SOLDAGEM GMAW DO AÇO CARBONO**

**THAÍRES VIEIRA FERREIRA**

**Tucuruí – PA  
2022**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**INFLUÊNCIA DA TENSÃO ELÉTRICA NA TRANSFERÊNCIA POR CURTO  
CIRCUITO NA SOLDAGEM GMAW DO AÇO CARBONO**

**THAÍRES VIEIRA FERREIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do título bacharel em Engenheiro Mecânico.

**Orientador:  
Prof. Dr. Douglas Neves Garcia.**

**Tucuruí – PA  
2022**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

F383i Ferreira, Thaires Vieira.  
Influência da tensão elétrica na transferência por curto circuito  
na soldagem GMAW do aço carbono / Thaires Vieira Ferreira. —  
2022.  
46 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Douglas Neves Garcia  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade  
Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de  
Engenharia Mecânica, Tucuruí, 2022.

1. Transferência metálica. 2. Respingos. 3. Acabamento  
superficial. 4. Índice Vilarinho de regularidade para  
transferência em modo curto-circuito. I. Título.

CDD 671.52

---



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**INFLUÊNCIA DA TENSÃO ELÉTRICA NA TRANSFERÊNCIA POR CURTO  
CIRCUITO NA SOLDAGEM GMAW DO AÇO CARBONO**

**THAÍRES VIEIRA FERREIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de  
Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Mecânica

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Douglas Neves Garcia  
FEM/CAMTUC/UFPA

---

Membro Interno: Prof<sup>o</sup> Dr. Wassim Raja El Banna  
NDAE/CAMTUC/UFPA

---

*Raillan de Lucas Arruda de Oliveira*

Membro Externo: Eng<sup>o</sup> Raillan de Lucas Arruda de Oliveira  
WHITE MARTINS

**Conceito: Excelente**

**Tucuruí, 17 de setembro de 2022**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte da minha vida, que recheia meus dias com Sua bondade e graça. Que me sustentou durante essa trajetória, com força, coragem e esperança. A Ele seja dada a glória para todo o sempre!

Aos meus pais, que nunca me deixaram faltar amor, cuidados e incentivo, me apoiando nos momentos mais difíceis, me inspirando em tudo o que faço.

Aos meus irmãos, Marcos, Mateus e Isabelly, que são a alegria dos meus dias, e me incentivam sempre a continuar.

Ao Prof<sup>o</sup>. Dr. Douglas Neves Garcia, que me orientou nesse trabalho, sempre com muita atenção e paciência, me auxiliando com seu vasto conhecimento.

Aos bolsistas Danielly, Felipe e Railson e ao técnico Rodimilson, que me auxiliaram nas atividades em laboratório e se empenharam juntamente comigo na realização desse trabalho. Vocês foram essenciais!

Aos demais professores do campus da UFPA em Tucuruí, que contribuem para a formação de excelentes profissionais da melhor forma que podem. Grata!

Ao meu grupo de estudos, Thais, Joicy, Élisson e Fernando, sem os quais nada disso seria possível, me auxiliando com amizade e transformando os momentos mais difíceis em risadas. Tenho certeza da excelência de profissionais que serão.

Ao meu amigo Rickelme que me apoia e ajuda desde o ensino médio e que esteve comigo também ao longo dessa trajetória.

À minhas amigas Jheilli e Dávilla, que me acompanharam, ouviram e incentivaram a continuar, sempre com muita atenção e amizade.

A todos os meus demais amigos e familiares que me ajudaram, apoiaram e incentivaram e que em nenhum momento duvidaram da minha capacidade de enfrentar os obstáculos que apareceram. Sou e sempre serei grata a cada um de vocês!

*Os que semeiam em lágrimas segarão com alegria. Aquele que leva a preciosa semente, andando e chorando, voltará, sem dúvidas, com alegria, trazendo consigo os seus molhos.*

*(Salmos 126: 5-6)*

## INFLUÊNCIA DA TENSÃO ELÉTRICA NA TRANSFERÊNCIA POR CURTO CIRCUITO NA SOLDAGEM GMAW DO AÇO CARBONO

### RESUMO

*Para realização de uma solda de qualidade é necessário que o processo seja estável, o que acontece quando existe regularidade na transferência metálica, quantidade de respingos gerados e aspectos do cordão de solda. Na transferência por curto-circuito, a estabilidade do processo é diretamente afetada pelas extinções periódicas do arco, que acontecem quando a gota metálica transferida entra em contato com a poça de fusão. Esta característica favorece o aumento da geração de respingos, o que diminui a capacidade produtiva do processo, seja devido à perda de material de adição ou à necessidade de gastos com a remoção, além de afetar a qualidade final da solda. Nesse contexto, propõe-se avaliar a regularidade da transferência por curto-circuito durante as soldagens por simples deposição em chapas de aço AISI 1020 com o arame AWS ER 70S-6, correlacionando-as com o Índice Vilarinho de Regularidade para Transferência em modo Curto-Circuito ( $IV_{CC}$ ), a regularidade geométrica e acabamento superficial dos cordões de solda. Para tanto optou-se por variar a tensão entre 19 e 24 V, mantendo os outros parâmetros fixos e o  $CO_2$  como gás de proteção. Os resultados indicaram boa faixa de regularidade, dentre os valores analisados, para as tensões de 20 a 22 V, bem como qualidade superficial dos cordões e menor nível de respingos.*

**Palavras-chave:** *Transferência metálica; Respingos; Acabamento superficial; Índice Vilarinho de Regularidade para Transferência em modo Curto-Circuito ( $IV_{CC}$ ).*

## INFLUENCE OF ELECTRICAL VOLTAGE ON SHORT CIRCUIT TRANSFER IN GMAW WELDING OF CARBON STEEL

### ABSTRACT

*In order to perform a quality weld, it is necessary that the process be stable, which happens when there is regularity in the metallic transfer, amount of spatter generated and aspects of the weld bead. In short-circuit transfer, the stability of the process is directly affected by the periodic arc extinctions, which occur when the transferred metallic drop comes into contact with the weld pool. This characteristic favors an increase in the generation of spatter, which reduces the productive capacity of the process, either due to the loss of filler material or the need to spend on removal, in addition to affecting the final quality of the weld. In this context, it is proposed to evaluate the regularity of short-circuit transfer during welding by simple deposition on AISI 1020 steel plates with AWS ER 70S-6 wire, correlating them with the Vilarinho Regularity Index for Transfer in Short Mode -Circuit ( $IV_{cc}$ ), the geometric regularity and surface finish of the weld beads. Therefore, it was decided to vary the voltage between 19 and 24 V, keeping the other parameters fixed and  $CO_2$  as the shielding gas. The results indicated a good range of regularity, among the analyzed values, for voltages from 20 to 22 V, as well as surface quality of the beads and a lower level of spatter.*

**Key words:** *Metallic transfer; Splash; Surface finish; Vilarinho Regularity Index for Transfer in Short-Circuit Mode ( $IV_{cc}$ ).*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Representação do processo de soldagem GMAW. ....	15
Figura 2. Processo GMAW + WAAM. ....	16
Figura 3. Equipamento básico para o processo GMAW. ....	17
Figura 4. Modos de transferência metálica. ....	18
Figura 5. Forças responsáveis pela transferência metálica em GMAW por curto-circuito a) no período de arco aberto; b) no período de curto-circuito. ....	19
Figura 6. Etapas da transferência por curto-circuito. ....	20
Figura 7. Transferência globular. ....	21
Figura 8. Transferência goticular. ....	22
Figura 9. Parâmetros da transferência por curto-circuito. ....	23
Figura 10. Curva de calibração da máquina. ....	26
Figura 11. Bancada funcional de manufatura aditiva a arco. a) Controle CNC; b) Sistema de eixo de coordenadas X, Y e Z; c) Braço para acoplamento da tocha de soldagem; d) Área de soldagem; e) fonte de soldagem; f) Área para computador. ....	26
Figura 12. Posicionamento da chapa para soldagem. ....	27
Figura 13. Critério para determinação do $IV_{cc}$ . ....	28
Figura 14. Etapas realizadas nos resultados e discussões do trabalho. ....	29
Figura 15. Oscilogramas com a tensão em 19V. ....	30
Figura 16. Oscilograma com a tensão em 20V. ....	30
Figura 17. Oscilogramas com a tensão em 21V. ....	31
Figura 18. Oscilogramas com a tensão em 22V. ....	31
Figura 19. Oscilogramas com a tensão em 23V. ....	32
Figura 20. Oscilogramas com a tensão em 24V. ....	32
Figura 21. Curva do Índice de regularidade $IV_{cc}$ em função da tensão de soldagem. ....	34
Figura 22. Comportamento da frequência em função da tensão de soldagem. ....	35
Figura 23. Comportamento do Período de curto-circuito em função da tensão de soldagem. ....	36
Figura 24. Relação da largura e reforço dos cordões de solda. ....	37
Figura 25. Cordões de solda com as tensões a) 19 V; b) 20 V. ....	38
Figura 26. Cordões de solda com as tensões a) 21 V; b) 22 V. ....	38
Figura 27. Cordões de solda com as tensões a) 23 V; b) 24 V. ....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparação das velocidades de soldagem do software e reais.....	25
Tabela 2. Composição química do arame eletrodo e do metal de base.....	27
Tabela 3. Parâmetros utilizados na soldagem das chapas .....	27
Tabela 4. Parâmetros de regularidade analisados.....	33
Tabela 5. Características geométricas dos cordões de solda .....	37
Tabela 6. Comparação dos resultados das análises .....	40

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI - American Iron and Steel Institute

ASME - American Society of Mechanical Engineers

AWS - American Welding Society

C.C - Curto-Circuito

CC+ - Corrente contínua com eletrodo no polo positivo

DBCP - Distância Bico De Contato/Peça

ESAB - Escola Superior Aberta do Brasil

et al - Et alili (e outros)

Fcc - Frequência de curto-circuito

Fcorte - Frequência de Corte para Tamanho Máximo de Gota na Transferência Metálica em modo Curto-Circuito

Fem - Força eletromagnética

Fg - Força da gravidade

Fs - Força superficial

GMAW - Gas Metal Arc Welding

Im - Intensidade média de corrente [A]

Is - Corrente de soldagem [A]

IVcc - Índice Vilarinho de Regularidade para Transferência em modo Curto-Circuito

LAPROSOLDA - Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem

Ls – Comprimento de arco

MAG - Metal Active Gas

MIG - Metal Inert Gas

Pa e Pb - Diferença de potencial entre as partículas

Pcc - Período de curto-circuito [s]

tma - Tempo médio de arco aberto [s]

tmc - Tempo médio de curto-circuito [s]

Um - Tensão média de soldagem [V]

Us - Tensão de Soldagem [V]

Va – Velocidade de alimentação [m/min]

Vs - Velocidade de Soldagem [mm/min]

WAAM - Wire + Arc Additive Manufacturing

## LISTA DE SÍMBOLOS

A - Ampere

Al - Alumínio

Ar – Argônio

C - Carbono

$CO_2$  - Dióxido de carbono

Cu - Cobre

Hz - Frequência

l/min - Vazão de gás (litro por minuto)

mm - milímetros

Mn - Manganês

P – Fósforo

s – Segundos

S - Enxofre

Si – Silício

Ti - Titânio

V - Volts

Zr - Zircônio

$\sigma_{t_{cc}}$  - Desvio padrão da média do tempo de curto circuito;

$\sigma_{t_{aa}}$  - Desvio padrão da média do tempo de arco aberto

% - Percentual

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1	OBJETIVOS .....	13
1.1.1	Objetivo geral .....	13
1.1.2	Objetivos específicos .....	13
1.2	JUSTIFICATIVA.....	14
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
2.1	PROCESSO GMAW .....	15
2.1.1	Equipamentos do processo GMAW .....	17
2.1.2	Parâmetros de soldagem.....	17
2.1.3	Transferência metálica .....	18
2.2	ESTABILIDADE NA TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-CIRCUITO ..	22
2.2.1	Índice Vilarinho de Regularidade para Transferência em modo Curto-Circuito ( <i>IV<sub>cc</sub></i> ) .....	23
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>29</b>
4.1	ANÁLISES DOS OSCIOGRAMAS .....	29
4.2	ANÁLISE DO ÍNDICE DE REGULARIDADE VILARINHO (IVCC) .....	32
4.3	ANÁLISE GEOMÉTRICA E SUPERFICIAL DOS CORDÕES DE SOLDA .....	36
4.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA A MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO ARCO + ARAME.....	39
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>41</b>
5.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	41
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>42</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) se destaca pela sua alta produtividade, elevadas taxas de deposição, facilidade em automação e elevado fator de trabalho. Outra característica desse processo é a sua alta versatilidade, que lhe permite soldar fora de posição, chapas finas, revestimentos metálicos e metais não ferrosos (SILVA, 2005).

Nesse processo, se a fonte for ajustada em tensão constante, com valores baixos de corrente e tensão média, a transferência da gota metálica se dá por curto circuito, onde o eletrodo é fundido e depositado à poça durante períodos de 20-150 Hz, gerando gotas que crescem e são transferidas a poça de fusão por tensão superficial (FOGLIATTO, 2013). A transferência metálica por curto circuito tem como principal vantagem o uso de uma baixa energia de soldagem, já que acontece em correntes e tensões baixas. A desvantagem desse tipo de transferência é de que a qualidade da solda tende a ser irregular, com arco instável e presença de respingos (MODENESI et al., 2011).

Para amenizar esse problema, se faz necessário o uso de métodos que estimem a regularidade do processo, de forma que haja constância na operação de soldagem (COSTA, 2014). Com essa finalidade, a análise de tensão e corrente por meio de oscilogramas se torna eficiente, bem como os métodos para quantificar a regularidade do processo, como é caso do Índice de Regularidade no modo curto-circuito,  $IV_{cc}$ , desenvolvido pelo LAPROSOLDA (Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem) (SOUZA, 2010).

Esse trabalho tem como finalidade obter o Índice de Regularidade no modo curto-circuito ( $IV_{cc}$ ), a fim de verificar a influência da variação da tensão de soldagem na regularidade da transferência metálica na soldagem do aço AISI 1020, buscando boa condição de estabilidade do processo.

### 1.1 OBJETIVOS

#### 1.1.1 Objetivo geral

- Avaliar a influência da tensão elétrica na transferência por curto circuito na soldagem GMAW do aço carbono.

#### 1.1.2 Objetivos específicos

- Calcular o índice  $IV_{cc}$  e verificar seu comportamento em função da variação da tensão de soldagem nos testes realizados.
- Avaliar a influência da variação da tensão de soldagem na geometria e acabamento superficial dos cordões de solda.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O processo GMAW é largamente utilizado na indústria, por possuir versatilidade, soldas de qualidade com produtividade, possibilidade de controle da poça de fusão em todas as posições e facilidade de automatização comparado com outros processos a arco (GOHR, 2002).

Um dos modos de transferência metálica mais utilizados nesse processo é o curto-circuito, que produz baixo aporte térmico, permitindo a soldagem fora de posição, a soldagem de chapas finas, de raiz ou abertas, causando baixa distorção do componente soldado (GOMES, 2006). Em contrapartida, esse modo de transferência produz grandes quantidades de respingos, gerando custos adicionais devido à perda de material e custos para retirada dos respingos (SOUZA et. al., 2011).

Dada a importância do processo, a busca por uma maior produtividade é essencial e se torna necessário o estudo voltado para a melhoria da regularidade na transferência por curto-circuito, buscando entender de que forma a variação de um dos parâmetros de soldagem mais importante no processo, que é a tensão elétrica, influencia na regularidade da transferência, geração de respingos e nas características geométricas e superficiais do cordão de solda.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Nesse trabalho, espera-se que os resultados obtidos possam contribuir para o estudo e estabilidade da transferência metálica, através da escolha adequada de parâmetros de soldagem, a fim de se alcançar qualidade na soldagem do aço carbono com o processo GMAW.

No capítulo 2 foi realizada uma visão geral dos conceitos teóricos da soldagem, fornecendo bases para compreensão, conhecimento e entendimento da temática abordada nesse trabalho. Já no capítulo 3 é tratada a metodologia e os equipamentos utilizados para a elaboração do trabalho. O capítulo 4 é usado para a apresentação dos resultados obtidos e a discussão dos mesmos. Por fim, no capítulo 5, são feitas as conclusões obtidas com a realização desse trabalho e sugestão para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

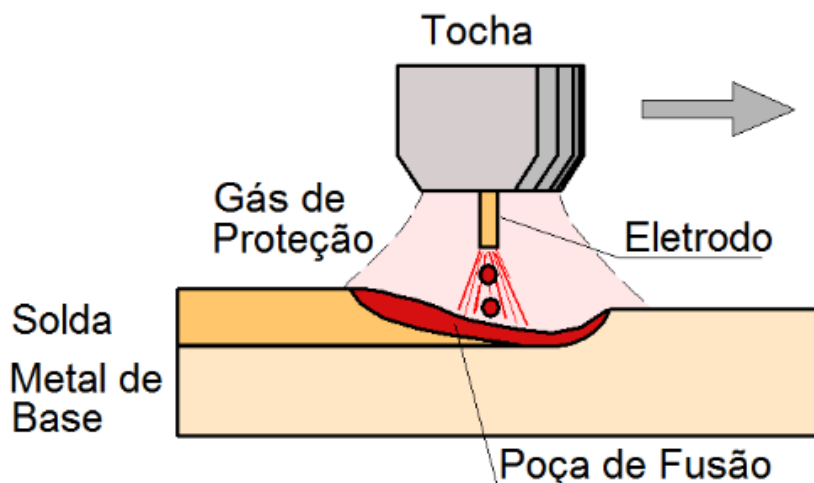
### 2.1 PROCESSO GMAW

O processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) apresenta-se como um dos principais processos de soldagem a arco elétrico, devido à elevada taxa de deposição de material, facilidade de automatização do processo, alto ciclo de operação (tempo de arco aberto / tempo total de produção) e soldagem podendo ser praticada em todas as posições (GOHR, 2002).

No processo GMAW, um arco elétrico é estabelecido entre um eletrodo consumível na forma de arame e a peça de trabalho, sendo a proteção do arco e do metal de solda, contra a contaminação pela atmosfera, feitas por um gás ou misturas de gases, que podem ser inertes (*Metal Inert Gas - MIG*) ou ativos (*Metal Active Gas - MAG*) (MODENESI ET AL., 2011).

Na região de soldagem, como representado na Figura 1, o processo ocorre com o arco elétrico sendo estabelecido entre arame eletrodo e a peça, fundindo a ponta do eletrodo conforme alimenta a poça de fusão para formação do cordão (MODENESI ET AL., 2011). Todo processo acontece sob a proteção de um fluxo de gás ou gases, sendo responsável por criar o ambiente em que se forma o arco e por proteger da oxidação a poça de fusão e as gotas metálicas em transferência (GOHR, 2002).

Figura 1. Representação do processo de soldagem GMAW.



Fonte: Modenesi et al., (2012).

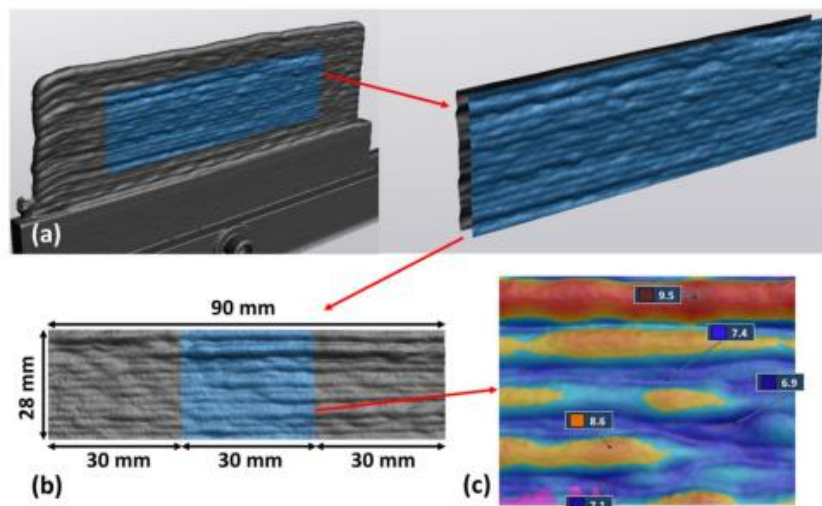
Devido ao calor gerado pelo arco formado entre a ponta do eletrodo e a peça de trabalho, as gotas de metal derretido são transferidas para peça, causando o processo mais importante na

determinação da qualidade do cordão de solda no processo GMAW, que é a transferência metálica (HUANG; ZHANG, 2010).

Por estar sendo melhorado continuamente, o processo GMAW se tornou aplicável aos aços, alumínio, aços inoxidáveis, cobre e vários outros, soldando materiais com espessura acima de 0,76 mm em praticamente todas as posições (ESCOLA SUPERIOR ABERTA DO BRASIL - ESAB, 2005).

Por suas características, o processo GMAW vem sendo utilizado juntamente com a manufatura aditiva utilizando arco + arame (*Wire + Arc Additive Manufacturing - WAAM*), a mais promissora tecnologia para fabricação de peças em metal atualmente, combinando o material e a fonte de calor da tecnologia da soldagem e o método da manufatura aditiva, fabricando componentes pela deposição de multicamadas. A combinação dos parâmetros do processo GMAW produz na geometria e na penetração do cordão de solda, atributos que são fundamentais para a realização da manufatura aditiva (VERÁSTEGUI et al., 2017), conferindo ao cordão características como alta taxa de deposição, resistência, densidade uniforme e possibilidade de fabricação de grandes componentes metálicos com baixo custo (HACKENHAAR, 2020). Na Figura 2 é mostrado o processo de medição das feições geométricas das paredes depositadas por meio de scanner 3D, no estudo de levantamento de parâmetros otimizados para a manufatura aditiva de paredes finas com o processo GMAW, realizado por Teixeira et al., (2021).

**Figura 2. Processo GMAW + WAAM.**

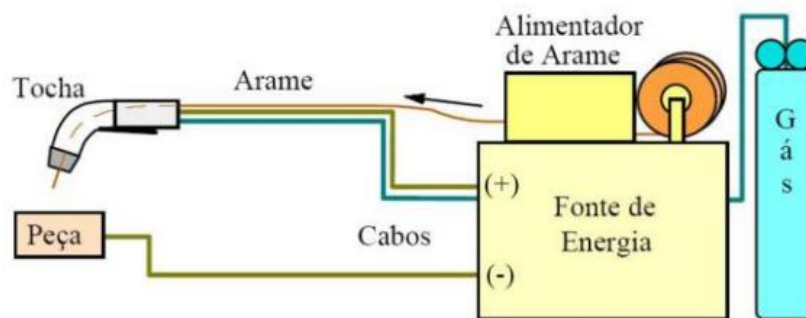


Fonte: Teixeira et al., (2021).

### 2.1.1 Equipamentos do processo GMAW

Segundo Modenesi et al., (2011), o processo GMAW pode ser realizado manual ou automaticamente, sendo o equipamento básico para o desenvolvimento do processo composto por uma fonte de energia, um sistema alimentador de arame, uma tocha de soldagem, um sistema fornecedor de gás, sistema de refrigeração da tocha, cabos e mangueiras, conforme a Figura 3.

Figura 3. Equipamento básico para o processo GMAW.



Fonte: Modenesi et al., (2011).

### 2.1.2 Parâmetros de soldagem

O entendimento das variáveis envolvidas no processo GMAW irá influenciar a estabilidade do arco elétrico e qualidade do cordão de solda. Dessa forma, se faz necessário o entendimento das principais variáveis do processo.

- a) Corrente de Soldagem ( $I_s$ ): A variação da corrente é diretamente proporcional à velocidade de alimentação do eletrodo. Essa variável influencia a geometria do cordão, o volume da poça, a taxa de fusão e afeta a microestrutura do metal depositado. Segundo Wainer et. al., (2004), a corrente é responsável por alterar a forma como a gota será transferida no processo.
- b) Tensão de soldagem ( $U_s$ ): A tensão de soldagem afeta o comprimento do arco, transferência metálica e formato do cordão (MODENESI et al., 2011). Tensões baixas geram cordões estreitos, e com maior reforço; o aumento da tensão implica o aumento do insumo de calor do processo, da zona termicamente afetada e o aparecimento de respingos, porosidade e mordeduras.
- c) Velocidade de soldagem ( $V_s$ ): É a velocidade com que a tocha avança sobre a peça de trabalho na direção de soldagem e influencia na quantidade de calor cedido à peça.

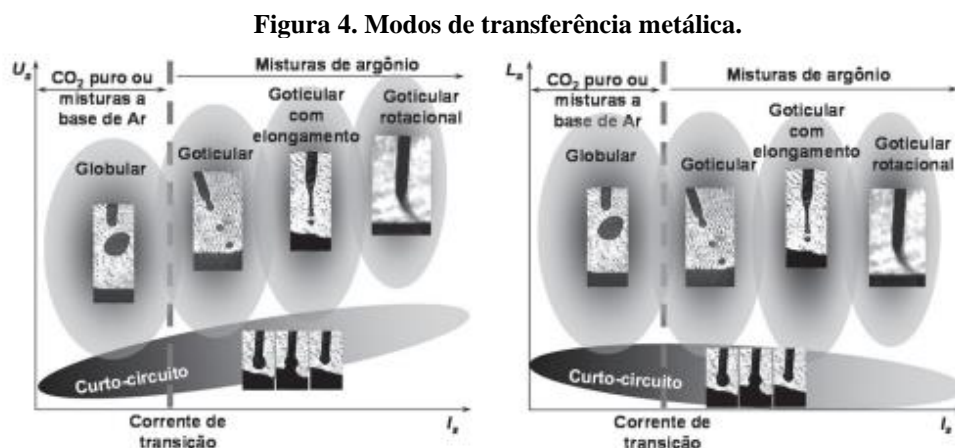
Velocidades de soldagem mais baixas geram cordões mais estreitos e com pouca penetração, podendo produzir mordeduras no cordão. Velocidades baixas aumentam a deposição de material, gerando cordões mais largos e reforçados (MODENESI et al., 2011)

- d) Indutância: O efeito indutivo atua como um amortecedor, controlando da taxa de subida e descida da corrente de soldagem. Quanto maior a indutância, mais lenta é o processo de crescimento e decrescimento da corrente (BAIXO; DUTRA, 1995).

### 2.1.3 Transferência metálica

O processo de soldagem MIG/MAG, por ser um processo que utiliza eletrodo consumível, é caracterizado pela forma como as gotas de metal fundido se deslocam da ponta do arame eletrodo até a poça de fusão através do arco. Esta transferência ocorre de diferentes modos, com diferentes tempos de crescimento, dimensões e frequências de destacamento e depende da corrente empregada, composição e diâmetro do eletrodo, extensão do eletrodo (“*stick-out*”) e gás de proteção utilizado (AMERICAN WELDING SOCIETY - AWS, 1991). O modo pelo qual o material é transferido no arco tem grande influência sobre a estabilidade do processo, pois afeta a estabilidade do arco, quantidade de respingos, as posições de soldagem e a aparência superficial do cordão de solda (MODENESI et al., 2011).

O processo GMAW inclui três formas principais de transferência metálica: a transferência por curto-circuito, a transferência globular e a transferência goticular, também chamada de “*spray*” ou aerossol (ESAB, 2005). Na Figura 4 são ilustrados os campos de incidência desses tipos de transferência em função da corrente e da tensão e em função do comprimento do arco e da corrente de soldagem.

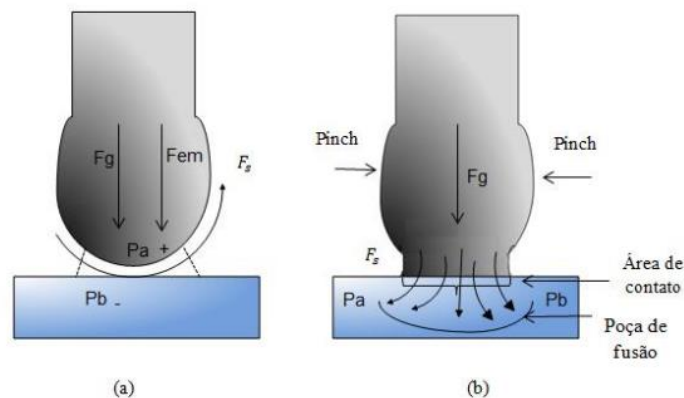


Fonte: Scotti e Ponomarev (2014).

Durante a transferência metálica do processo GMAW, um conjunto de forças agem sobre a extremidade fundida do eletrodo, poça de fusão e arco voltaico. Os mecanismos fundamentais envolvidos nesse processo se originam pela ação das forças eletromagnética, gravitacional e tensão superficial. A magnitude dessas forças é influenciada pelas variáveis elétricas (tensão e corrente), pela composição química do eletrodo e da peça e pela atmosfera inerte ou ativa do arco elétrico (BAIXO, 1999).

Scotti e Ponomarev (2014), descrevem duas teorias fundamentais no momento da transferência metálica, que são a Teoria de Equilíbrio das Forças Estáticas e a Instabilidade de *Pinch*. A Teoria de Equilíbrio das Forças Estáticas determina que a gota é transferida quando o somatório das forças de destacamento supera o somatório das forças de retenção à sua transferência, e a Instabilidade *Pinch* deriva as dimensões das gotículas, a partir de constrições locais considerando instabilidades em colunas de líquidos. Quando o efeito *Pinch* supera o efeito da tensão superficial, a coluna se rompe e uma pequena gota residual se forma, tornando os efeitos das outras forças desprezíveis. Portanto, essas teorias dizem que a gota metálica está submetida a um conjunto de forças, que irão contribuir ou dificultar o seu destacamento. Na Figura 5 são mostradas algumas dessas forças, as quais estão envolvidas no processo de transferência metálica por curto-circuito, no período de arco aberto (a) e no período de curto-circuito (b).

**Figura 5. Forças responsáveis pela transferência metálica em GMAW por curto-circuito a) no período de arco aberto; b) no período de curto-circuito.**



Fonte: Meneses (2013).

Onde:  $F_{em}$  é a contribuição da força eletromagnética;  $F_g$  é a força da gravidade;  $F_s$  é a força superficial;  $P_a$  e  $P_b$  é a diferença de potencial entre as partículas.

Tendo como objetivo desse trabalho avaliar a transferência por curto-circuito, será feita uma descrição mais detalhada apenas desse modo de transferência.

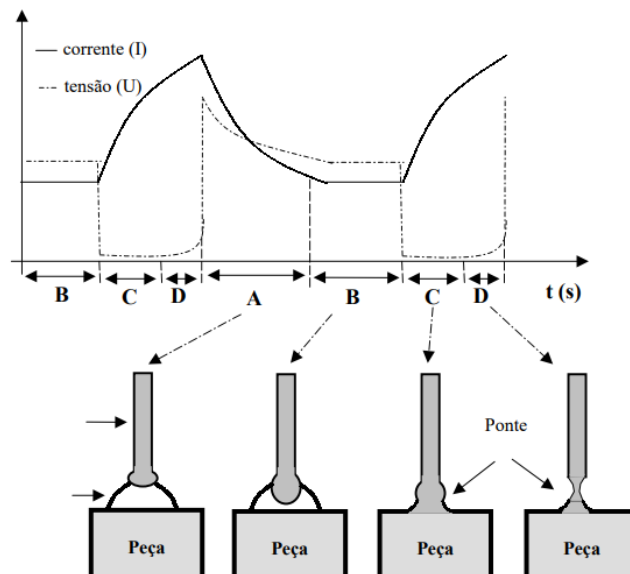
### 2.1.3.1 Transferência por Curto-circuito

Segundo Souza et al., (2011), a transferência metálica por curto-circuito no processo GMAW é caracterizada pelo contato regular entre a gota de metal fundido, ainda ligado ao eletrodo, e a poça de fusão. Esse modo de transferência ocorre em níveis de tensão e corrente mais baixas, apresentando menor poça de fusão devido à intensidade de energia mais baixa, em comparação com os outros tipos de transferência metálica (MOTTA et al., 2005).

Esse modo de transferência ocorre no momento de curto-circuito, com uma frequência de 20 a 200 vezes por segundo e é amplamente utilizado para a soldagem de aço carbono, usado com arame entre 0,8 mm e 1,2 mm de diâmetro, e gás de proteção a base  $CO_2$ , produzindo uma pequena poça de fusão de solidificação rápida (ESAB, 2005).

Gohr (2002) descreve o processo de separação da gota metálica, no curto-circuito, em quatro etapas distintas, conforme a Figura 6. No primeiro momento (A), quando o eletrodo se encontra no ponto mais afastado da poça de fusão, a corrente e a tensão atingem seus máximos. O valor da corrente reduz a fim de levar a tensão ao valor ajustado na fonte, por meio da indutância que determinará essa taxa de decréscimo, seguido de um período de estabilização do arco (B). Quando a gota toca a poça de fusão, acontece o curto-circuito, elevando a corrente, fundindo o eletrodo por efeito Joule e transferindo material à poça pela tensão superficial e forças eletromagnéticas (C). O restante de material fundido na ponta do eletrodo forma uma ponte entre ele e a peça. Com a redução da espessura da ponte, aumentam o efeito “*Pinch*” e a intensidade da corrente, causando o destacamento da gota (D).

**Figura 6. Etapas da transferência por curto-circuito.**



Fonte: Gohr (2002).

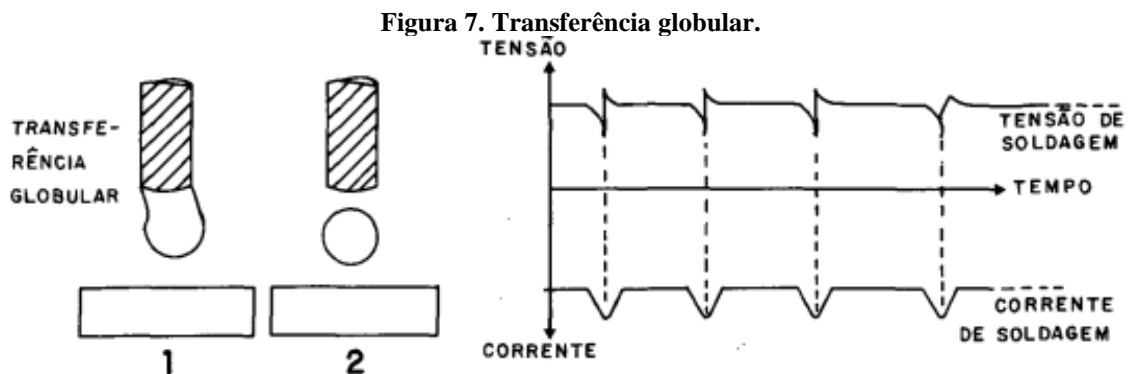
Como os valores de corrente e tensão durante a fase de arco aberto são baixos e o arco tende a se apagar nos tempos de curto-circuito, o calor transferido para a peça é reduzido, sendo empregado quando é necessário um nível pequeno de distorção da peça soldada e que necessite de baixo aporte de calor (GOMES, 2006).

Por outro lado, a transferência por curto-circuito pode apresentar grande instabilidade no arco, podendo apresentar formação intensa de respingos, necessitando serem selecionados parâmetros de soldagem e ajuste da fonte adequados para que a transferência seja estável (MODENESI et al., 2011).

### 2.1.3.2 *Transferência globular*

A transferência globular acontece quando a corrente e tensão de soldagem estão acima do recomendado para curto-circuito. Nesse modo de transferência, as gotas transferidas possuem diâmetro maior que o eletrodo (ESAB, 2005). Esse tipo de transferência resulta em um arco mais estável do que no curto-circuito, todavia a gota se transfere de forma mais caótica e imprevisível (MODENESI et al., 2011)

Segundo Cruz e Cabral (2008), devido ao tamanho da gota, nesse modo de transferência metálica a força gravitacional é dominante, restringindo a soldagem à posição plana. A transferência globular é representada na Figura 7.

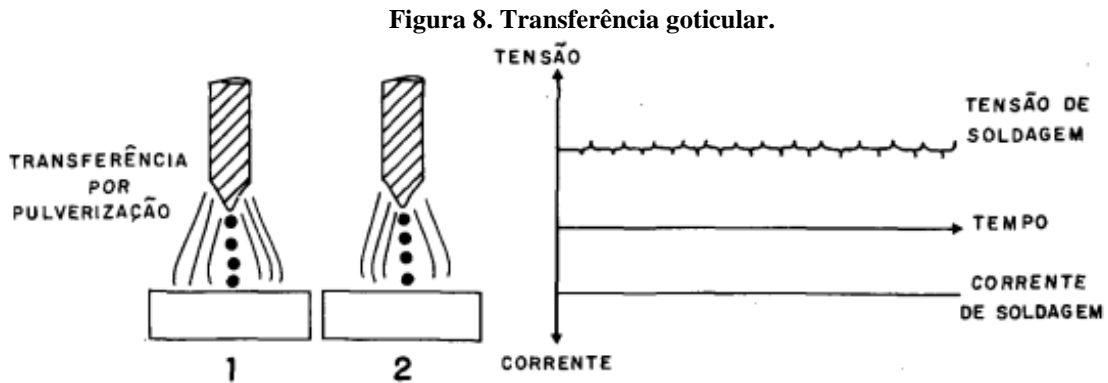


Fonte: Wainer et. al., (2004).

### 2.1.3.3 *Transferência goticular*

Para que a transferência goticular ocorra, é necessário que a corrente seja elevada até a chamada corrente de transição. Nesse modo, os diâmetros das gotas são menores que no modo

globular, formando um jato contínuo de pequenas gotas (MODENESI et al., 2011). A soldagem é realizada apenas nas posições plana e horizontal, devido a fluidez da poça de fusão causada pela alta energia com que são depositadas na poça. Esse modo de transferência gera altas taxas de deposição (ESAB, 2005). A transferência goticular é representada na Figura 8.



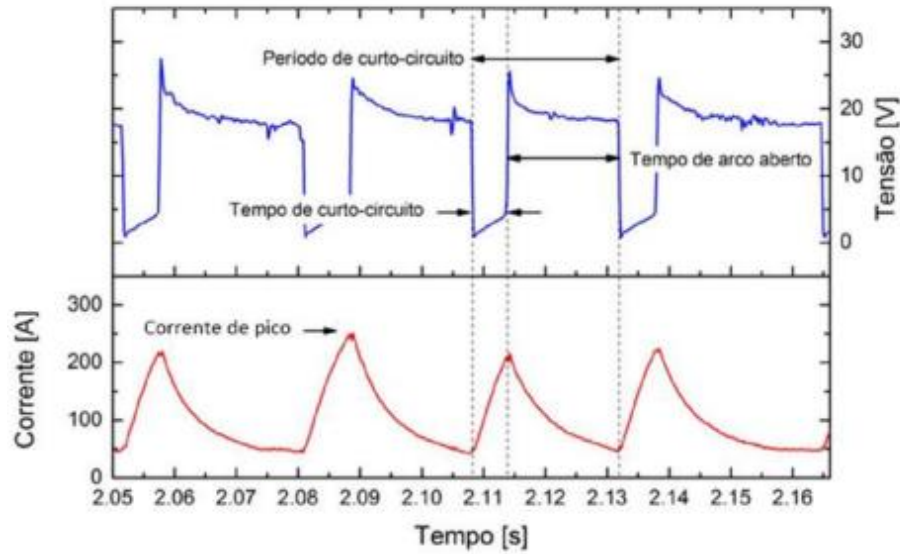
Fonte: Wainer et. al., (2004).

## 2.2 ESTABILIDADE NA TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-CIRCUITO

O modo de transferência por curto-circuito acontece quando a gota metálica formada na ponta do eletrodo toca a poça de fusão, por isso esse modo de transferência é mais suscetível a instabilidades, com a geração de uma elevada quantidade de respingos, particularmente ao final de cada curto circuito. Dessa forma, para que os cordões de solda tenham boa qualidade e redução de respingos é necessário melhorar a estabilidade do processo (COSTA, 2014).

Para Gonçalves et al., (2008), a estabilidade na transferência da gota é atribuída ao processo pela existência da regularidade na transferência metálica, de forma a apresentar um comportamento homogêneo ao longo do cordão de solda, produzindo o mínimo de respingos, além de uma poça e metal de solda geometricamente uniformes por todo cordão. Já a regularidade da transferência por curto-circuito, é descrita como resultado da variação dos parâmetros da transferência: tempos de curto-circuito, tempos de arco aberto e picos de corrente (SILVA, 2005). Esses parâmetros são mostrados na Figura 9, por meio de um oscilograma característico do modo de transferência por curto-circuito.

**Figura 9. Parâmetros da transferência por curto-circuito.**



Fonte: Costa (2014).

Na transferência por curto circuito, a estabilidade do arco pode ser avaliada pelo soldador por meio da luminosidade, ruído e respingos durante o processo de soldagem (CASTRO, 2017). Todavia, foram desenvolvidos outros meios de avaliar a estabilidade do arco, como análises do comportamento do sinal de corrente e tensão de soldagem. Diferentes critérios têm sido propostos para avaliar a regularidade da transferência da gota como indicativo de estabilidade, os quais fornecem índices baseados em análises dos sinais obtidos na aquisição de corrente e tensão de soldagem (COSTA, 2014). Esse trabalho irá utilizar para quantificar a regularidade da transferência da gota metálica o Índice Vilarinho de Regularidade para Transferência em modo Curto-Circuito ( $IV_{cc}$ ), desenvolvido pelo grupo LAPROSOLDA.

### 2.2.1 Índice Vilarinho de Regularidade para Transferência em modo Curto-Circuito ( $IV_{cc}$ )

Com o objetivo de quantificar a estabilidade da transferência por curto circuito no processo de soldagem MIG/MAG, o Grupo LAPROSOLDA da Universidade Federal de Uberlândia criou o Critério LAPROSOLDA para Regularidade da Transferência Metálica em modo Curto-Circuito, composto pelo critério Índice Vilarinho de Regularidade para Transferência em modo Curto-Circuito ( $IV_{cc}$ ) (SOUZA, 2010).

O Índice Vilarinho de Regularidade para Transferência em modo Curto-Circuito ( $IV_{cc}$ ), descrito na eq.(1), se baseia na premissa de que a estabilidade da transferência por curto circuito está ligada com a constância dos tempos em curto circuito e com arco aberto, ou seja, acredita-

se que, se os tempos sofrem pouca variação tanto em curto-circuito como em arco aberto, o processo está estável (SOUZA, 2010). Conforme o critério, quanto melhor o valor de  $IV_{cc}$  mais estável tende a ser a soldagem.

$$IV_{cc} = \frac{\sigma t_a}{t_{ma}} + \frac{\sigma t_c}{t_{mc}} \quad (1)$$

Onde:  $\sigma t_c$  = desvio padrão da média do tempo de curto circuito;  $\sigma t_a$  = desvio padrão da média do tempo de arco aberto;  $t_{mc}$  = média do tempo de curto-circuito;  $t_{ma}$  = média do tempo de arco aberto.

Conforme descrito por Rodrigues e Scotti (2003), o processo de soldagem no modo de transferência curto-circuito apresenta um comportamento cíclico no processo de crescimento da gota e transferência de metal. O crescimento da gota acontece no período de arco aberto, e durante o período de curto-circuito, a transferência da gota metálica do eletrodo para o metal de base acontece. Dessa forma, esse comportamento cíclico, que é frequência de ocorrências de curtos-circuitos ( $F_{CC}$ ) é descrita em termos do tempo de curto-circuito ( $t_{mc}$ ) e de arco aberto ( $t_{ma}$ ), conforme mostrado na eq.(2).

$$F_{CC} = \frac{1}{t_{ma} + t_{mc}} \quad (2)$$

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

As atividades realizadas nesse trabalho foram realizadas no laboratório de soldagem localizado no laboratório de engenharia mecânica da Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí e iniciaram tendo como base as informações de calibração da bancada funcional de manufatura e o estabelecimento de alguns parâmetros de soldagem, indicados adiante.

As informações da calibração da bancada funcional de soldagem a arco são essenciais para a validação do seu uso em pesquisas científicas. Conforme os pesquisadores Oliveira e Costa (2021), as informações da calibração estão presentes na Tabela 1. Para os autores, a máquina precisa ser calibrada, para garantir que a velocidade e o deslocamento da tocha sejam iguais aos pré-estabelecidos no software MACH3®, a fim de que ocorra precisão na deposição de material, evitando deformações no cordão de solda. Para tanto a margem de erro entre a velocidade de avanço da tocha definidos na mesa e a velocidade de avanço real percorrida pela tocha precisa ser a menor possível. Para a calibração, os autores supracitados realizaram 50 testes, no eixo X, sendo 5 testes para cada valor de velocidade estabelecida que foram de 100 a 1000 mm/min, usando um deslocamento de 130 mm.

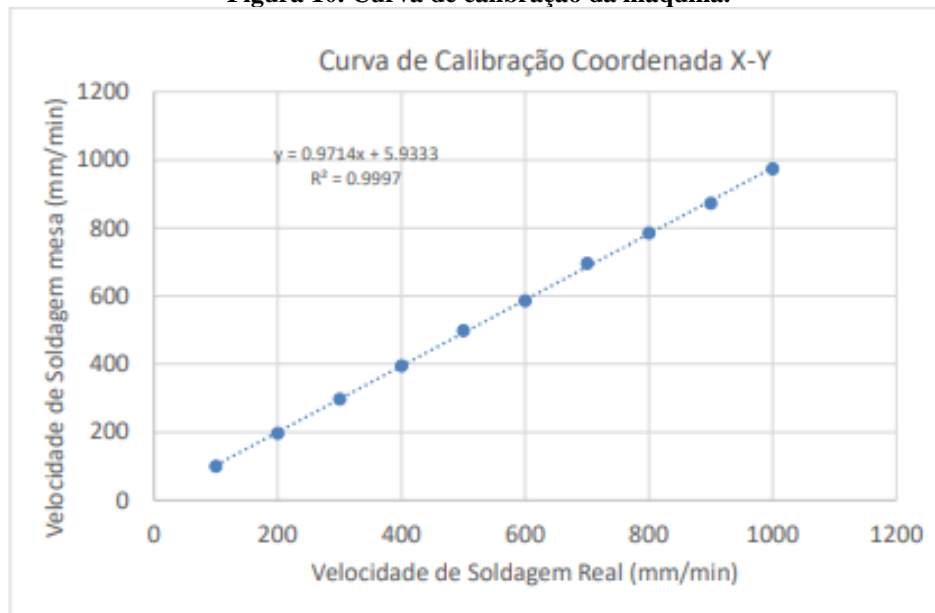
**Tabela 1. Comparação das velocidades de soldagem do software e reais**

<b>Software</b>	<b>Real</b>
<b>Vel. (mm/min)</b>	<b>Vel. (mm/min)</b>
100	100
200	197
300	297
400	395
500	499
600	586
700	696
800	785
900	873
1000	974

Fonte: Adaptado de Oliveira e Costa (2021).

Na Figura 10 é apresentada a curva de calibração da máquina, mostrando uma precisão de 99%.

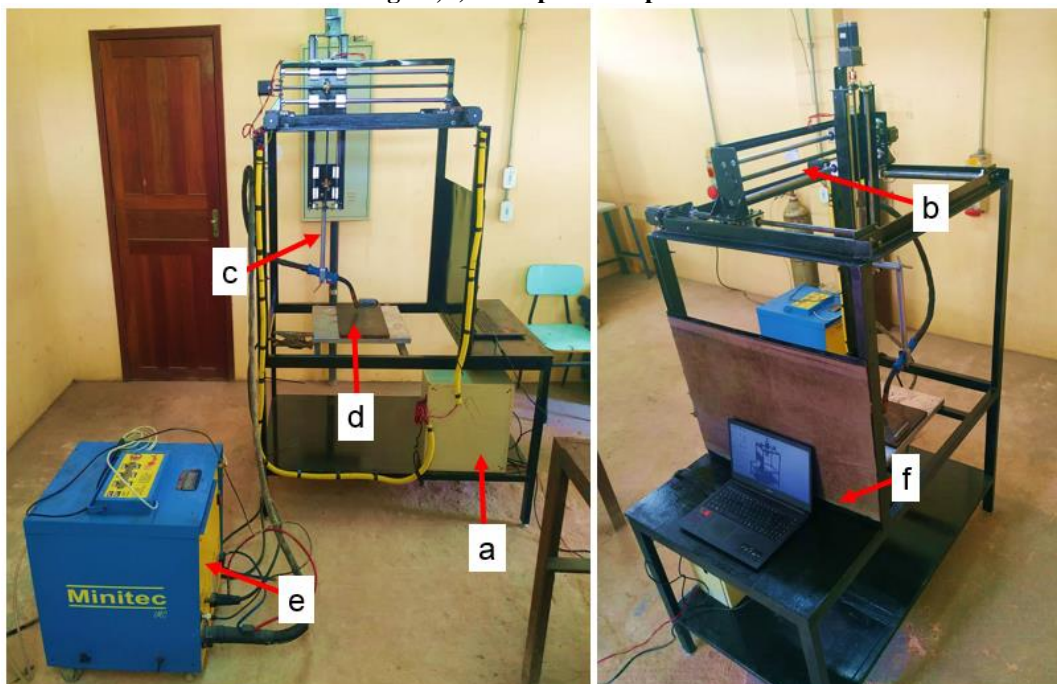
**Figura 10. Curva de calibração da máquina.**



Fonte: Oliveira e Costa (2021).

As soldagens foram realizadas na posição plana com o auxílio de uma mesa funcional para manufatura aditiva para deposição a arco (Figura 11), responsável pelo posicionamento e movimentação mecanizada da tocha, uma fonte de soldagem Minitec IMC ajustada em CC+ e sistema de aquisição SAP V4.28s para o monitoramento dos dados instantâneos da corrente e da tensão de soldagem em oscilogramas.

**Figura 11. Bancada funcional de manufatura aditiva a arco. a) Controle CNC; b) Sistema de eixo de coordenadas X, Y e Z; c) Braço para acoplamento da tocha de soldagem; d) Área de soldagem; e) fonte de soldagem; f) Área para computador.**



Fonte: Autoria própria.

Como materiais consumíveis foi utilizado arame eletrodo da classe AWS ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm, consumível selecionado devido a aplicação em grande escala na soldagem de aço carbono, e  $CO_2$  puro foi usado como gás de proteção, numa vazão de 14 l/min.

Foram utilizadas como metal de base chapas de aço carbono AISI 1020, nas dimensões 130 mm x 12,5 mm x 4 mm, as superfícies foram limpas para retirada de carepa, graxa, óleo e pontos de oxidação e, então, posicionadas conforme a Figura 12. A Tabela 2 apresenta a composição química do metal de adição e do metal de base:

**Figura 12. Posicionamento da chapa para soldagem.**



Fonte: Autoria própria.

**Tabela 2. Composição química do arame eletrodo e do metal de base**

	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ti	Zr	Al
<b>Metal de adição</b>									
<b>AWS ER70S-6</b>	0,07- 0,15	0,80- 1,15	1,40- 1,85	0,025	0,035	0,025	0,035	0,035	0,05- 0,15
<b>Metal de Base</b>									
<b>AISI SAE 1020</b>	0,18- 0,23	0,30- 0,60	-	0,04	0,05	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de Lobato (2010).

Os cordões de solda foram fabricados tendo como base os parâmetros contidos na Tabela 3, determinados através de experimentos preliminares, variando apenas o valor da tensão de 19 a 24V.

**Tabela 3. Parâmetros utilizados na soldagem das chapas**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Gás de Proteção	$CO_2$
Vazão de Gás	14 l/min
Distância Bico de Contato Peça (DBCP)	13 mm
Velocidade de alimentação ( $V_a$ )	4 m/min
Velocidade de soldagem ( $V_s$ )	350 mm/min
Indutância ( $K_s=K_d$ )	100

Fonte: Autoria própria.

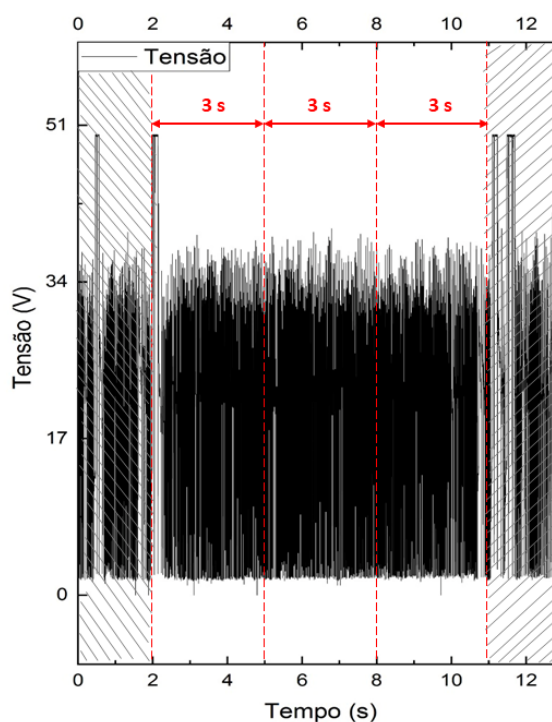
Realizada a etapa de fabricação dos cordões de solda, parte-se para a análise dos resultados obtidos.

A análise da regularidade da transferência metálica é feita a partir do critério proposto por Souza (2010). Para a determinação do índice de regularidade  $IV_{cc}$ , neste trabalho foi utilizado o programa CURTO5, desenvolvido em linguagem *Matlab*® pelo Grupo LAPROSOLDA/UFU, que apresenta a medição dos valores médios e eficazes de sinais elétricos.

De acordo com Fernandes e Vilarinho (2012), na operação em curto-circuito convencional, para que os valores de tensão de curto-circuito e intervalo de tempo influenciem na análise e nos resultados obtidos pelo critério, os mesmos precisam ser até 5,0 V e 6,0 s, respectivamente. A fim de obter resultados mais confiáveis e precisos, a análise destes sinais para obtenção dos índices foi realizada em um intervalo de tempo entre os 2 s iniciais e os 2 s finais, desconsiderando os intervalos de abertura e encerramento do arco elétrico, onde normalmente ocorrem instabilidades.

O intervalo de tempo entre os 4s desconsiderados, foi dividida em comprimentos de tempo de 3s, segundo recomendado por Souza (2010) e demonstrado na Figura 13, a fim de avaliar a variação dos parâmetros ao longo do cordão de solda. Em seguida, foi realizada a média aritmética e o desvio padrão dos resultados obtidos para  $IV_{cc}$  para cada experimento.

**Figura 13. Critério para determinação do  $IV_{cc}$ .**

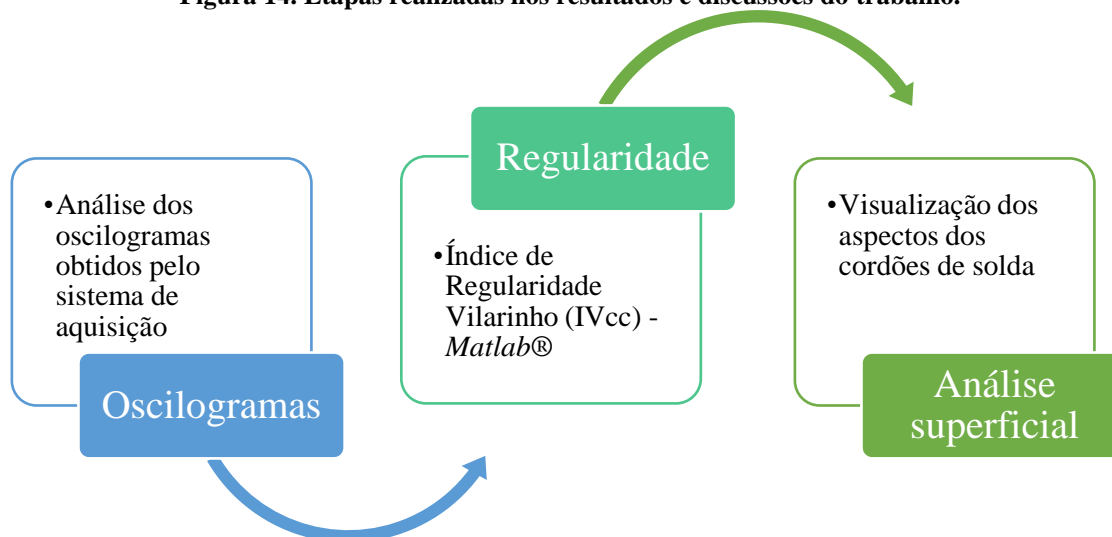


Fonte: Autoria própria.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As análises das soldas obtidas foram realizadas seguindo as etapas presentes na Figura 14.

Figura 14. Etapas realizadas nos resultados e discussões do trabalho.



Fonte: Autoria própria.

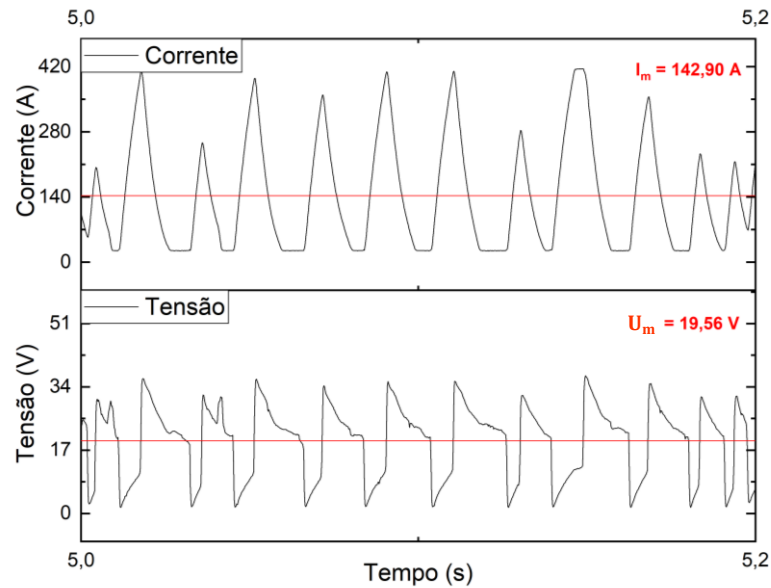
### 4.1 ANÁLISES DOS OSCILOGRAMAS

As instabilidades devido aos períodos de curto-circuito no modo de transferência por curto-circuito no processo GMAW são consideradas inerentes ao processo (GONÇALVES et al., 2008), além do fato de que a ocorrência dos curtos tem certo caráter aleatório, pela dispersão apresentada nos valores do intervalo de tempo entre a ocorrência de dois curtos-circuitos subsequentes, particularmente em condições de operações instáveis (MODENESI et al., 2011). Nesse contexto, os oscilogramas de corrente e tensão constituem uma ferramenta viável para o estudo das condições operacionais deste tipo de transferência.

Os gráficos Tempo x Tensão e Tempo x Corrente de cada cordão são apresentados nas Figuras de 15 a 20, onde também são indicados seus valores médios de corrente e tensão. Observa-se através dos oscilogramas que a transferência metálica nos cordões desenvolvidos muito provavelmente se caracterizou por curto-circuito já que estes apresentam características desse tipo de transferência e do gás de proteção empregado.

No oscilograma do cordão obtido com a tensão de 19V (Figura 15) observa-se a predominância de grandes tempos de arco aberto, o que não é um bom indicio de regularidade, já que resulta em gotas maiores e menor frequência de curtos-circuitos.

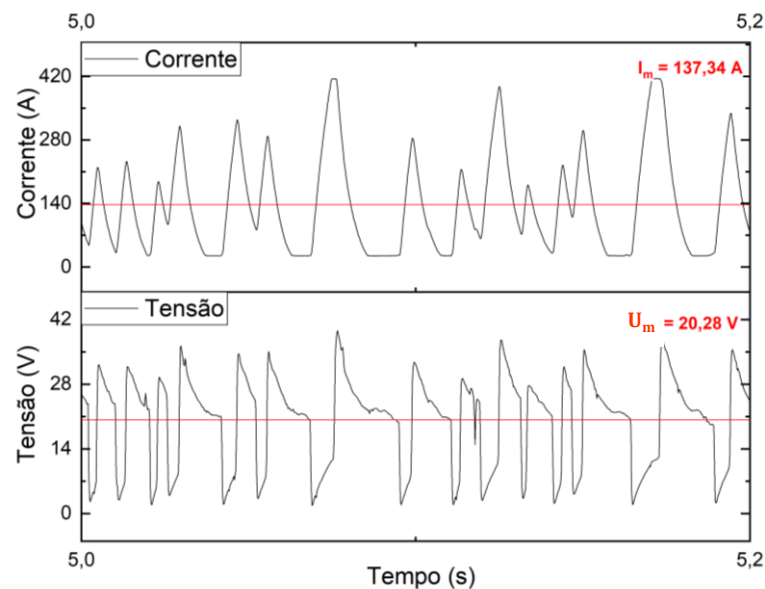
**Figura 15. Oscilogramas com a tensão em 19V.**



Fonte: Autoria própria.

Para a tensão de 20V, o oscilograma equivalente (Figura 16) tem o comportamento mais variado quando comparado com o cordão de 19V. São observados tempos de arco aberto em maiores tempos, e variação dos picos de corrente, o que pode resultar em menor frequência de curtos-circuitos e menor regularidade.

**Figura 16. Oscilograma com a tensão em 20V.**

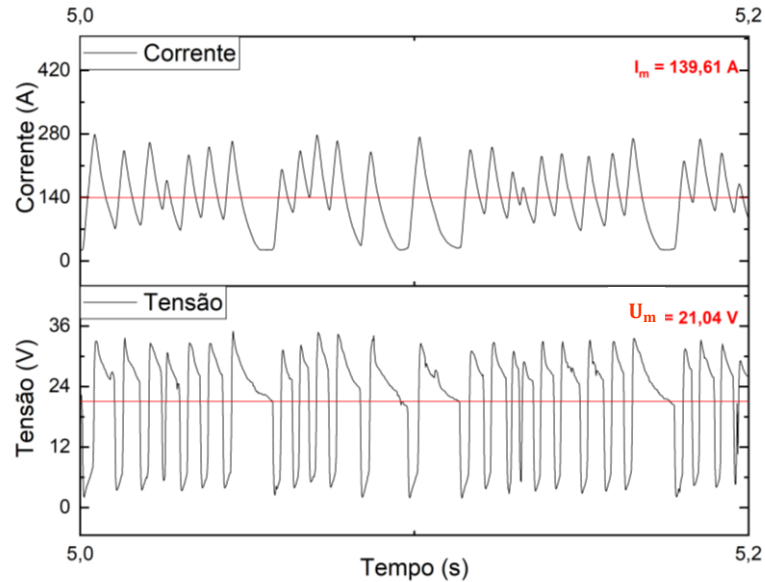


Fonte: Autoria própria.

O oscilograma para o cordão de 21V (Figura 17) apresenta características de arcos abertos e curtos-circuitos em menores intervalos de tempo. Essa característica confere uma transferência de metal fundido com maior regularidade e com poucos respingos. A maior

frequência de curtos-circuitos pode indicar que o processo exibe um comportamento mais estável.

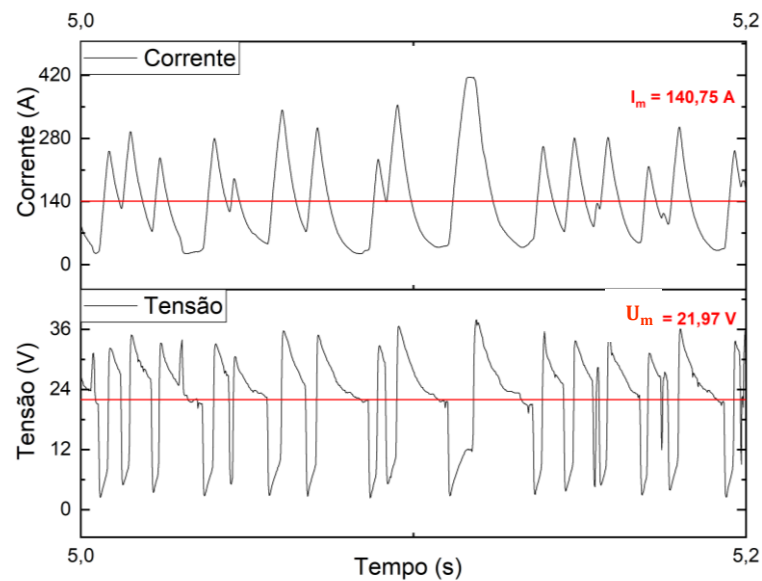
**Figura 17. Oscilogramas com a tensão em 21V.**



Fonte: Autoria própria.

Assim como para o cordão de 20 V, o oscilograma indicado para o cordão de solda produzido com 22V (Figura 18), apresenta comportamento variado, apresentando arcos abertos se manifestando em maior intervalo de tempo e também variação dos picos de corrente.

**Figura 18. Oscilogramas com a tensão em 22V.**

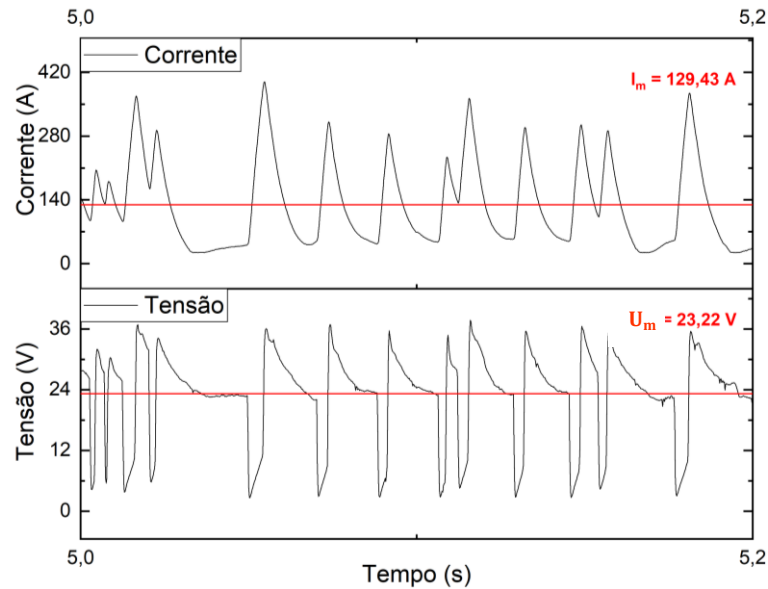


Fonte: Autoria própria.

Nos cordões de solda concebidos com 23V e 24V verificou-se constância na manifestação de arcos abertos com grandes tempos de ocorrência, essa característica permite a

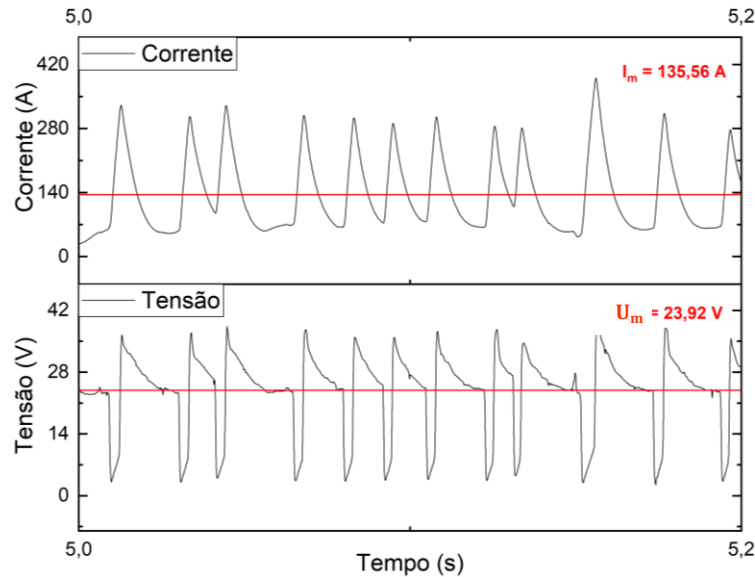
formação de maiores gotas de metal fundido, já que é no período do arco que ocorre a formação e o crescimento da gota na ponta do eletrodo gerado pela acumulação do metal sob a existência do arco elétrico. (Figuras 19 e 20).

**Figura 19. Oscilogramas com a tensão em 23V.**



Fonte: Autoria própria.

**Figura 20. Oscilogramas com a tensão em 24V.**



Fonte: Autoria própria.

#### 4.2 ANÁLISE DO ÍNDICE DE REGULARIDADE VILARINHO (IVCC)

As características relativas à regularidade dos curtos-circuitos são quantificadas com base nos parâmetros: Índice Vilarinho de Regularidade para Transferência em modo Curto-

Circuito ( $IV_{cc}$ ) e os desvios padrão dos tempos de curto-circuito ( $\sigma_{cc}$ ) e de arco aberto ( $\sigma_{aa}$ ); frequência de curto-circuito ( $f_{cc}$ ) e período de curto-circuito ( $P_{cc}$ ), que é a soma dos tempos médios de curto-circuito ( $t_{mc}$ ) e tempos médios de arco aberto ( $t_{ma}$ ).

As condições de melhor regularidade foram:

- Quanto menor o valor de  $IV_{cc}$  mais estável tende a ser a soldagem;
- Maiores frequências de curto-circuito ( $f_{cc}$ ) foram consideradas melhores, pois tendem a aumentar o rendimento da soldagem e apresentar um arco com maior regularidade;
- Menores variações nos tempos de curto-circuito ( $\sigma_{cc}$ ) e de arco aberto ( $\sigma_{aa}$ ), pois implicam em melhor regularidade da transferência metálica com curto-circuito.
- Menores períodos de curto-circuito ( $P_{cc} = t_{ma} + t_{mc}$ ), pois formam gotas de menor volume e contribuem para melhorar a regularidade do arco.

A Tabela 4 foi desenvolvida para facilitar a análise dos resultados obtidos no CURTO5.

**Tabela 4. Parâmetros de regularidade analisados**

Tensão (V)	Quant. C.C	Freq. C.C	$t_{mc}$ (s)	$t_{ma}$ (s)	$\sigma_{cc}$	$\sigma_{aa}$	Tempo	Pcc (s)	IVcc
							médio entre C.C(s)		
19	226	75,4	0,0016	0,0117	0,00033	0,00873	0,0133	0,0133	0,9661
20	288	96	0,0013	0,0091	0,0004	0,00503	0,0104	0,0104	0,8558
21	286	95,4	0,0012	0,0093	0,0004	0,00517	0,0105	0,0105	0,8852
22	280	93,3	0,0009	0,0098	0,00033	0,00477	0,0107	0,0107	0,8507
23	230	76,6	0,0085	0,0083	0,00203	0,00383	0,0131	0,0168	0,7917
24	171	56,98	0,0009	0,0166	0,00027	0,0069	0,0176	0,0175	0,6785

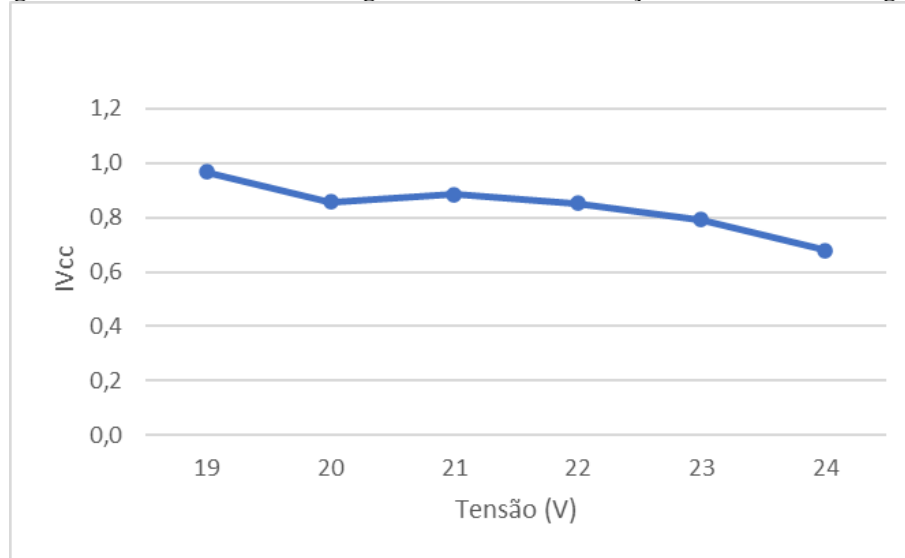
Fonte: Autoria própria.

Analisando os resultados de  $IV_{cc}$ , observa-se que seus valores tendem a aumentar e diminuir com o aumento da tensão, a partir da tensão de 20 V. O comportamento da curva do Índice de regularidade em função da tensão de soldagem nesse trabalho apresenta comportamento de aumento e diminuição com o aumento da tensão, semelhantes aos encontrados nos trabalhos de Souza (2010), para aço carbono com Ar + 8%  $CO_2$  e para Souza e Ferraresi (2013) com 100%  $CO_2$  como gás de proteção.

Com base no de  $IV_{cc}$ , percebe-se uma condição com boa regularidade de transferência por curto-circuito para as tensões reguladas de 20 V a 24 V, observadas, também, através da pouca variação entre os tempos de arco aberto e variação dos tempos de curto-circuito,

analisado por meio dos desvios padrão de tempo de curto-circuito ( $\sigma_{CC}$ ) e tempo de arco aberto ( $\sigma_{AA}$ ). Um mínimo desvio do período de duração conduz a uma melhor estabilidade da solda e, provavelmente, uma menor formação de salpicos resultando em qualidades superiores da solda (SILVA, 2005). A relação entre o índice de regularidade e a tensão de soldagem é mostrado na Figura 21.

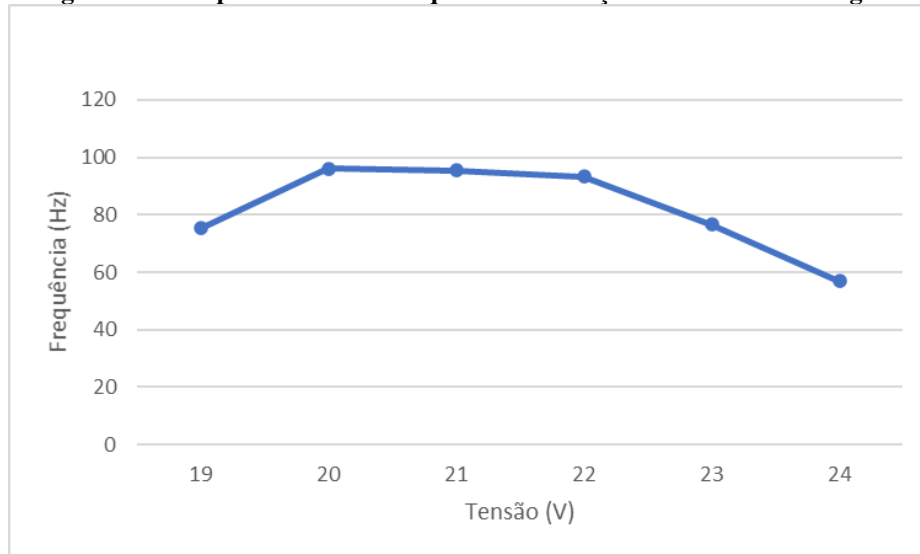
**Figura 21. Curva do Índice de regularidade  $IV_{cc}$  em função da tensão de soldagem.**



Fonte: Autoria própria.

Considerando a frequência de curto-circuito para os ensaios realizados, tendo como base a maior frequência como melhor regularidade de transferência, pode-se afirmar, com base apenas nesse requisito, que existe uma faixa de boa regularidade entre 20 a 22 V. Observa-se, também, uma tendência de declínio da frequência conforme a tensão de soldagem aumenta, como é mostrado na Figura 22, comportamento semelhante ao encontrado na literatura de Souza e Ferraresi (2013). Ainda pela Figura 22, é possível perceber, por intermédio da baixa frequência de curtos-circuitos, que para tensões maiores ou iguais a 23 V a transferência metálica começa a perder sua característica de curto-circuito, passando para uma faixa de transição para transferência globular. É importante destacar que a transferência tendendo para globular pode apresentar alta regularidade, medida pelo baixo valor de  $IV_{cc}$ , como afirmam Rezende et al., (2010), e que pode ser observado para a tensão referida na Tabela 4.

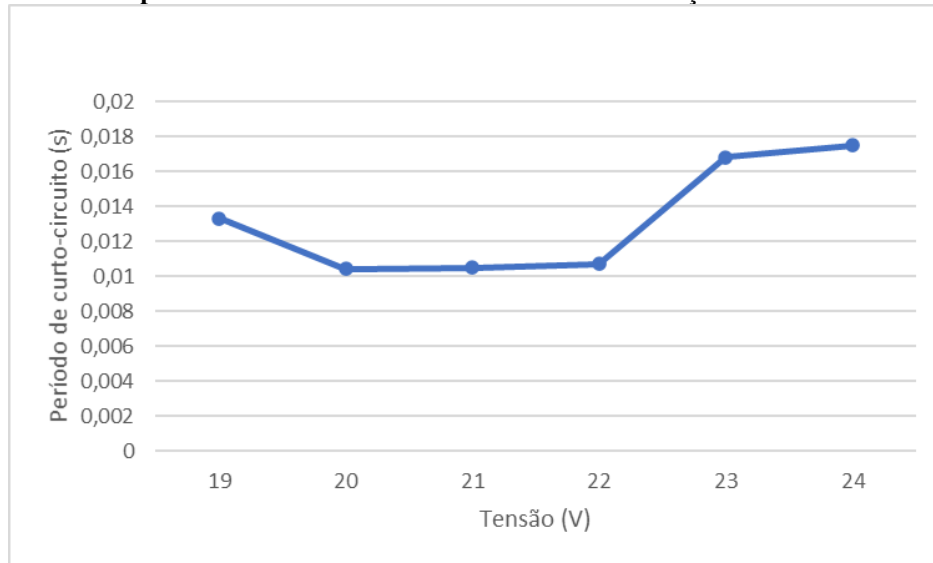
**Figura 22. Comportamento da frequência em função da tensão de soldagem.**



Fonte: Autoria própria.

Considerando a análise de regularidade de transferência metálica através do período de curto-circuito, a Figura 23 apresenta os resultados para as soldagens realizadas. Os resultados mostram que o aumento da tensão contribuiu para aumentar o período de curto-circuito ( $P_{cc} = t_{ma} + t_{mc}$ ). É observado, então, que o aumento da tensão resulta em diminuição da regularidade da transferência metálica por curto-circuito na posição plana para o processo e gás de proteção usados.

É possível verificar, também, os valores de tempo médio de arco aberto na Tabela 4, e como sofreram influência com o aumento da tensão. Vale ressaltar que o aumento deste tempo favorece o crescimento das gotas, antes da transferência. Desta forma, a melhor regularidade relativa de transferência, considerando o período de curto-circuito, ocorreu para os valores de tensão de soldagem de 20 a 22 V. Confirma-se, também, o que foi dito a respeito das tensões a partir de 23 V, sendo possível observar a transição de transferência para globular, pelo maior tempo de arco aberto.

**Figura 23. Comportamento do Período de curto-circuito em função da tensão de soldagem.**

Fonte: Autoria própria.

Analisando os parâmetros de forma conjunta, observa-se que, existe uma faixa de tensão entre 20 e 22 V em que existem boas condições de regularidade de transferência metálica. Os resultados obtidos coincidem com os observados na literatura consultada, como Souza et al., (2011), que concluiu, com base na frequência de curto-circuito, que as melhores condições de estabilidade relativa de transferência para o processo MIG/MAG estão na faixa entre 18 a 22 V, correntes em torno de 160 A e  $CO_2$  puro como gás de proteção, e que o aumento da tensão regulada aumenta o tempo de arco aberto, aumentando o período de curto-circuito e seu desvio padrão, diminuindo a estabilidade relativa de transferência metálica.

Observou-se, também, a tendência que as tensões iguais e superiores a 23 V apresentaram à mudança de tipo de transferência metálica, o que foi analisado pelas frequências de curto-circuito que diminuíram com a tensão, os tempos de arco aberto maiores que proporcionam geração de gotas maiores, bem como o aumento de tempo entre curtos-circuitos e a decrescente quantidade de curtos-circuitos que ocorrem para essas tensões, como apresentado na Tabela 4.

#### 4.3 ANÁLISE GEOMÉTRICA E SUPERFICIAL DOS CORDÕES DE SOLDA

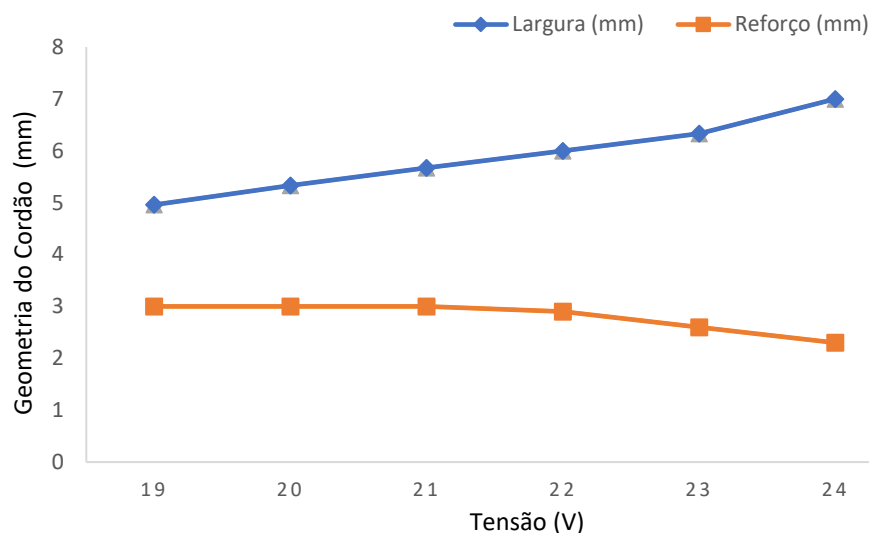
Na Tabela 5 é mostrado os valores das análises geométricas, obtidas nos cordões de solda no processo GMAW para as tensões já mencionadas.

**Tabela 5. Características geométricas dos cordões de solda**

<b>Cordão</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Largura (mm)</b>	<b>Reforço (mm)</b>
<b>1</b>	19	4,96	3,00
<b>2</b>	20	5,33	3,00
<b>3</b>	21	5,67	3,00
<b>4</b>	22	6,00	2,90
<b>5</b>	23	6,33	2,60
<b>6</b>	24	7,00	2,30

Fonte: Autoria própria.

Na figura 24 é apresentado como o aumento da tensão influenciou nas larguras e reforços dos cordões de solda. É possível observar que à medida que a tensão foi aumentada, os cordões ficaram mais largos e menos reforçados.

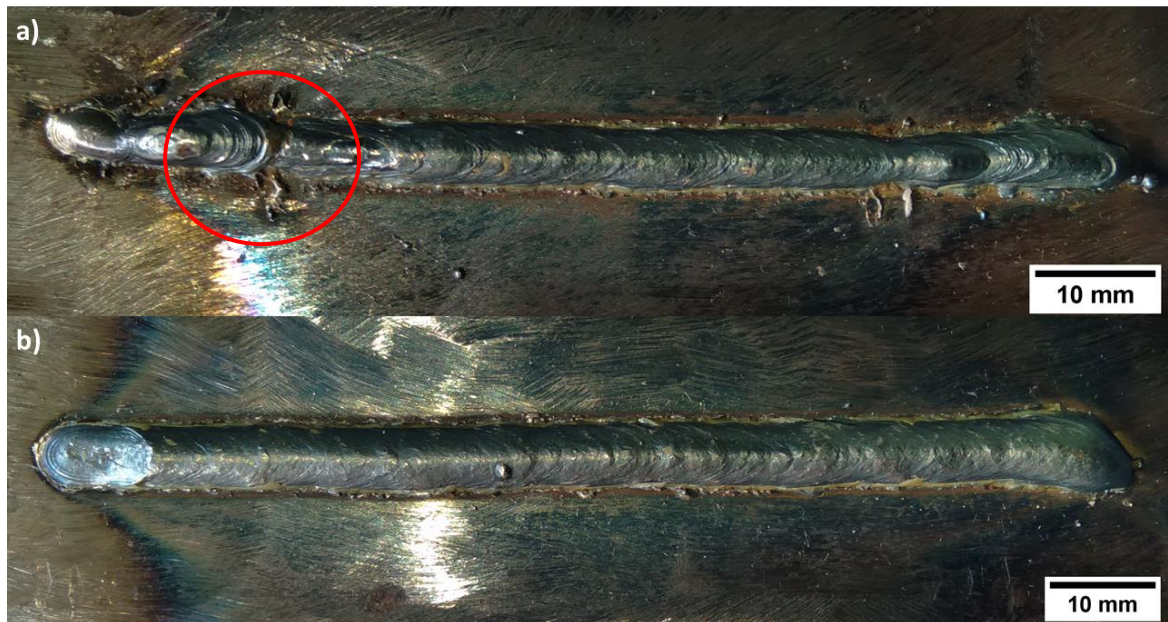
**Figura 24. Relação da largura e reforço dos cordões de solda.**

Fonte: Autoria própria.

Nas Figuras 25, 26 e 27 são mostrados os cordões de solda obtidos conforme os parâmetros e oscilogramas apresentados anteriormente, sendo possível realizar a análise superficial dos mesmos. A direção da soldagem é da direita para a esquerda.

Realizando uma avaliação superficial do cordão utilizando 19V, percebe-se que ele apresenta aparente instabilidade na abertura do arco, além de um defeito ocasionado por falha na alimentação do arame (identificado pelo círculo em vermelho). Cabe ressaltar que é o único cordão que apresenta esse defeito. Conforme foi observado por meio dos índices de regularidade, o cordão com 19 V não apresentou boa regularidade apresentando valores não favoráveis aos critérios estabelecidos (Figura 25 a). O cordão de 20 V boa regularidade, ótimas características superficiais e poucos respingos (Figura 25 b).

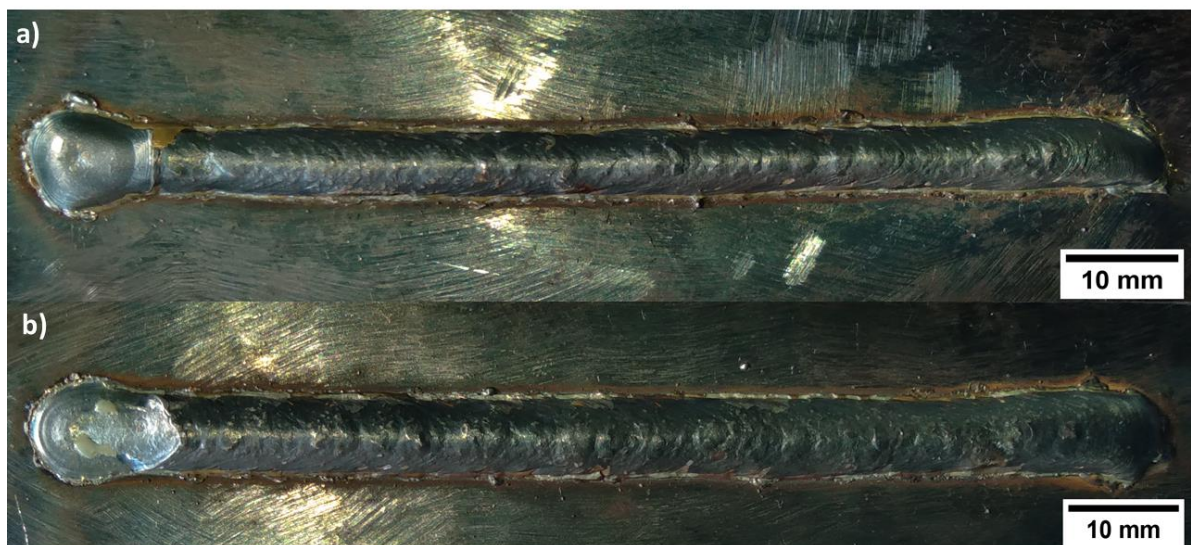
**Figura 25. Cordões de solda com as tensões a) 19 V; b) 20 V.**



Fonte: Autoria própria.

Para o cordão 21V, percebe-se boa abertura de arco e poucos respingos. Como foi observado tal tensão apresentou boa regularidade com boa quantidade de arco aberto e curto-circuito ocorridos em menor quantidade de tempo, se tratando de uma boa característica para o modo transferência metálica em curto-circuito, conferindo ao cordão boa transferência e qualidade da solda (Figura 26 a). O cordão fabricado com 22V obteve pouquíssimos respingos e cordão com abertura de arco aparentemente estável, e assim como para a tensão anterior, apresentou boa regularidade, o que pode ser observado na Figura 26 b.

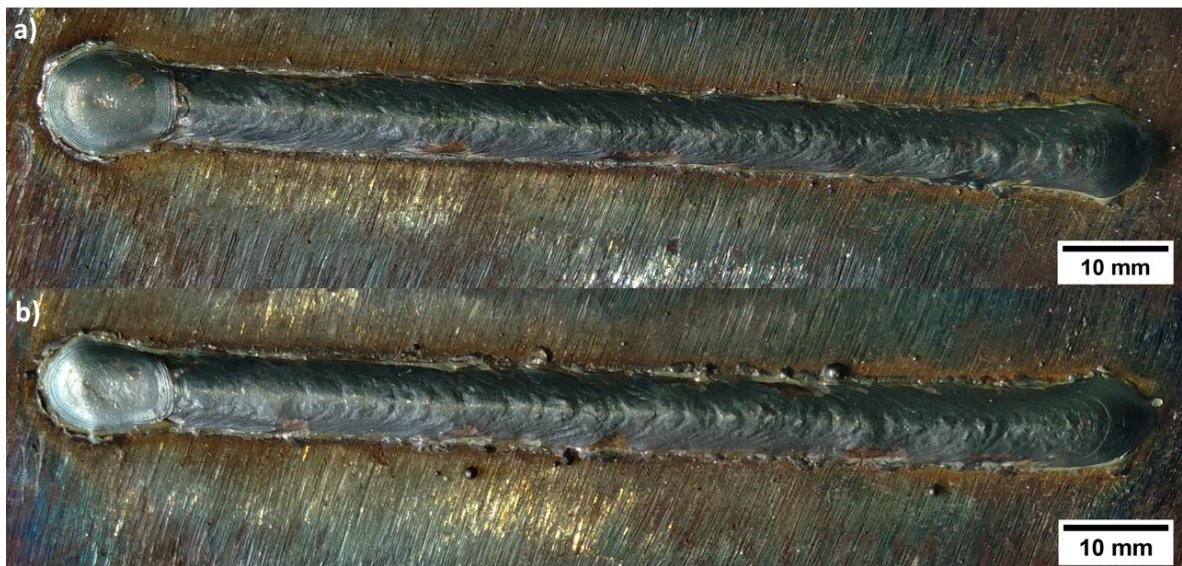
**Figura 26. Cordões de solda com as tensões a) 21 V; b) 22 V.**



Fonte: Autoria própria.

De acordo com os critérios de regularidade, os cordões realizados com as tensões de 23 V e 24 V, apresentam transição da transferência metálica de curto-circuito para globular. A presença de respingos pode ser explicada devido a esse modo de transferência como afirma Modenesi et al., (2011), como os tempos de arco aberto são relativamente grandes, permitem maior fusão do material, maior gota de material fundido, logo, maior tendência de ocorrer respingos durante o processo (Figura 27).

**Figura 27. Cordões de solda com as tensões a) 23 V; b) 24 V.**



Fonte: Autoria própria.

#### 4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA A MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO ARCO + ARAME

Os resultados desse trabalho posteriormente serão usados para deposição de paredes de soldas pela manufatura aditiva por deposição arco + arame. Para essa aplicação, os cordões precisam ter bom reforço, pouca largura e ausência de defeitos. Assim sendo, foi realizada uma análise prévia de forma qualitativa para o trabalho futuro com base nas análises realizadas. As características geométricas dos cordões de solda, quantidade de respingos e/ou defeitos e regularidade da transferência metálica foram avaliadas e comparadas, levando em consideração sua aplicação para manufatura aditiva, conforme exposto na Tabela 6.

**Tabela 6. Comparação dos resultados das análises**

<b>Cordão</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Reforço</b>	<b>Largura</b>	<b>Regularidade</b>	<b>Respingos/Defeitos</b>
<b>1</b>	19	Bom	Pouca	Ruim	Poucos/ Sim
<b>2</b>	20	Bom	Pouca	Boa	Poucos/Nenhum
<b>3</b>	21	Bom	Pouca	Boa	Poucos/Nenhum
<b>4</b>	22	Pouco	Boa	Boa	Poucos/Nenhum
<b>5</b>	23	Pouco	Boa	Ruim	Poucos/Nenhum
<b>6</b>	24	Pouco	Boa	Ruim	Muitos/Nenhum

Fonte: Autoria própria.

Com base nas análises, o melhor cordão para ser usado na futura aplicação seria o realizado com 21 V que apresentou bom reforço, poucos respingos, qualidade superficial e bons resultados nos critérios estabelecidos para regularidade na transferência metálica por curto-circuito no processo GMAW para o aço carbono.

## 5 CONCLUSÃO

A fim de produzir cordões de solda de qualidade é necessário que o processo de soldagem ocorra de forma estável, por meio da regularidade dos parâmetros envolvidos no processo no momento da transferência metálica, bem como boa qualidade superficial da solda, por meio da ausência de defeitos e redução de respingos.

De acordo com o que foi observado nesse trabalho, percebe-se uma boa condição de regularidade de transferência por curto-circuito para as tensões reguladas de 20 V, 21 V e 22 V, quantificada por meio do Índice de Regularidade no modo curto-circuito (IV<sub>cc</sub>). Observou-se, também, que a faixa de tensão encontrada com boa regularidade foi analisada por outros autores que voltaram seus estudos para o processo GMAW do aço carbono na posição plana, mesmo com os parâmetros, que aqui foram mantidos fixos, sendo diferentes. Vale mencionar, ainda, a tendência que as tensões iguais e superiores a 23 V apresentaram à mudança de tipo de transferência metálica, para os parâmetros e condições de soldagem selecionados nesse trabalho.

Deve-se pontuar, também, que os cordões apresentam boa qualidade superficial, regularidade geométrica e se mantiveram uniformes, não houveram mordeduras, trincas e porosidades aparentes e presença de poucos respingos.

### 5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Verificar a regularidade da transferência metálica com outras misturas de gases de proteção.
- Avaliar a influência da variação da indutância na regularidade da transferência por curto-circuito e características superficiais e geométricas dos cordões de solda.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AWS – AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook Processes, Vol. 1, 8ª edição**, USA, 1991.

BAIXO, C. **Estudo da Soldagem MIG/MAG pela Técnica Hiperbárica a Seco**. 1999. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina.

CASTRO, J. N. **Estudo Comparativo Entre As Técnicas De Curto Circuito Convencional E Controlado A Partir De Soldagens Exploratórias Por Simples Deposição E Passe De Raiz Em Soldagem MIG/MAG**. 2017. 66 f. Trabalho De Conclusão De Curso (Graduação) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

COSTA, T. F. **Avaliação de Critérios de Estabilidade do Processo MIG/MAG curto-circuito na Soldagem de Aços inoxidáveis austenítico e duplex**. 2014. 56f. Tese de Doutorado em Engenharia mecânica – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

CRUZ, JUNIOR; CABRAL, T. S. **Especificação de Procedimentos de Soldagem MIG para o Preenchimento de Cavidades pela Técnica de Camadas Sucessivas**. 2008. 78 p. Trabalho De Conclusão De Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Belém.

BAIXO, C. E.; DUTRA, J. C.; E OLLÉ, L. F. **Instrumentação para Estudo da Transferência Metálica em Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito**. In: XXI ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM- ENTS, 867–902. 1995.

ESAB. **Soldagem MIG / MAG**. (C. Fortes e C. Turani Vaz, Eds.), 2005, Brasil.

FERNANDES, D. B.; VILARINHO, L. O. **Verificação da Significância Estatística da tensão de curto-circuito e do tempo de análise no Critério LAPROSOLDA para Regularidade da Transferência Metálica no modo curto-circuito**. Relatório Interno LAPROSOLDA/UFU 07/2012, 2012.

FOGLIATTO, A.A.B. **Influência dos parâmetros do processo MIG/MAG com Curto Circuito Controlado sobre a geometria do cordão de solda**. 2013. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GOHR, R. J. **Novos Métodos de Controle da Soldagem MIG/MAG**. 2002. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

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

GONÇALVES, H., DUTRA, J. C., E GOHR, R. (2008). **Fundamentos Científicos e Tecnológicos para o Desenvolvimento do Processo MIG / MAG por Curto- Circuito Controlado (CCC) – Uma Revisão da Literatura. Parte 3 de 3: Princípios dos Sistemas MIG / MAG em Curto-Circuito com Controle de Corrente**. Soldagem & Inspeção, 13(1), 70– 81.

HACKENHAAR, W. **Estudo das propriedades mecânicas e do resfriamento em manufatura aditiva por deposição a arco**. 2021.

HUANG, Y., E ZHANG, Y. M. (2010). **Laser-Enhanced GMAW Abstract**. Welding Research, 89, 2010, 181–188.

LOBATO, A. **Estudo da estabilidade de arco das soldas executadas com o processo de soldagem GMAW-CW**. 2010. SBPC62.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte. Ed. da UFMG, 2011.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte. Ed da UFMG. 2012.

MENESES, L. Y. H. **Modelagem e simulação da transferência metálica no processo GMAW-S em soldagem orbital**. 2013. 174 f. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM-65A/13 - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal.

MOTTA, M. F.; DUTRA, J. C.; GOHR Jr.; R SCOTTI, A. **A Study on out-of-phase current pulses of the double-wire MIG-MAG process with insulated potentials on cating applications**. Welding & Cutting, Vol. 4, n.1, DVS Germany, 2005.

OLIVEIRA, P. E. S.; COSTA, R. C. **Projeto e construção de uma mesa funcional para manufatura aditiva por deposição a arco**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Tucuruí.

REZENDE, G. M., O. LISKÉVYCH, L.O. VILARINHO, A. SCOTTI. **Um Critério para Determinar a Regulagem da Tensão em Soldagem GMAW por Curto-circuito**. 2011. Soldagem e Inspeção. São Paulo. Vol.16, No.2, p. 098-103.

RODRIGUES, C. E. A. L.; SCOTTI, A. **Avaliação Cinemática e Elétrica Da Transferência Metálica Na Soldagem MIG/MAG**. 2003.

SILVA, R. H. G. **Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito controlado aplicada ao passe de raiz**. 2005. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina.

SCOTTI, A., PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. São Paulo: Artliber Editora, 2014, 288 p.

SOUZA, D. **Levantamento de mapas Operacionais de Transferência Metálica para Soldagem MIG/MAG de Aço ao Carbono na Posição Plana**. 2010. 304 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SOUZA, D., LEMOS, M., KEOCHEGUERIAN, F., CASTANHEIRA, V., OLIVEIRA, L., VILARINHO, L E SCOTTI, A. (2011). **Influência da Tensão de Soldagem e do Gás de Proteção sobre a Correlação entre Indutância e Regularidade da Transferência Metálica na Soldagem MIG / MAG por Curto-Circuito**. Soldagem & Inspeção, 16(2), 114–122.

TEIXEIRA, F. R.; SCOTTI, F. M.; VILARINHO, L. O.; MOTA, C. A. M.; SCOTTI, A. **Transferability of the working envelope approach for parameter selection and optimization in thin wall WAAM**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, p. 1-21, 2021.

VERÁSTEGUI, R. N.; HACKENHAAR, W.; MAZZAFERRO, J. A. E. **Estudo preliminar sobre a influência dos parâmetros do processo de soldagem MAG robotizado, aplicação em manufatura aditiva**. In: XLIII CONSOLDA—Congresso Nacional de Soldagem 06 a 09 de novembro de 2017 Joinville-SC, Brasil.

WAINER, E., BRANDI, S. D., & MELLO, F. D. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. São Paulo: Editora Edgar Blucher, 1992, p 99.