



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Weslei Rodrigues Niz

INFLUÊNCIA DA TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE NA REGULARIDADE DO PROCESSO MIG/MAG POR CURTO-CIRCUITO

Goiânia

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Weslei Rodrigues Niz

3. Título do trabalho

Influência da taxa de subida da corrente na regularidade do processo MIG/MAG por curto-circuito

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a)** consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
- b)** novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;

- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Souza, Professor do Magistério Superior**, em 27/03/2023, às 16:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Weslei Rodrigues Niz, Discente**, em 27/03/2023, às 20:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3626308** e o código CRC **78AFD709**.

Weslei Rodrigues Niz

**INFLUÊNCIA DA TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE NA
REGULARIDADE DO PROCESSO MIG/MAG POR CURTO-
CIRCUITO**

Tese de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação. Área de Concentração: Ciências Mecânicas

Orientador: Prof. Dr. Daniel Souza
Coorientador: Prof. Dr. Demostenes Ferreira Filho

Universidade Federal de Goiás
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação

Goiânia

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Rodrigues Niz, Weslei
INFLUÊNCIA DA TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE NA
REGULARIDADE DO PROCESSO MIG/MAG POR CURTO-
CIRCUITO [manuscrito] / Weslei Rodrigues Niz. - 2023.
LXXVIII, 78 f.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Souza; co-orientador Dr. Demostenes
Ferreira Filho.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola
de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa
de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Goiânia, 2023.

Bibliografia.

Inclui siglas, fotografias, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas,
lista de figuras, lista de tabelas.

1. indutância. 2. curto-circuito. 3. soldagem MIG/MAG. 4.
regularidade. I. Souza, Daniel, orient. II. Título.

CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 07 da sessão de Defesa de Dissertação de **Weslei Rodrigues Niz**, que confere o título de Mestre(a) em **Engenharia Mecânica**, na área de concentração em **Ciências Mecânicas**.

Ao vigésimo sétimo dia do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e três, a partir da(s) 15h00min., no(a) auditório do prédio do curso de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “**Influência da taxa de subida da corrente na regularidade do processo MIG/MAG por curto-circuito**”. Os trabalhos foram instalados pelo(a) Orientador(a), Professor(a) Doutor(a) **Daniel Souza (UFG)**, com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor(a) Doutor(a) **Kleber Mendes de Figueiredo (UFG)**, membro titular externo; Professor(a) Doutor(a) **Marcelo Lemos Rossi (UFPEL)**, cuja participação ocorreu através de videoconferência, membro titular externo e Professor(a) Doutor(a) **Demostenes Ferreira Filho (UFG)**, membro titular interno. Durante a arguição os membros da banca não fizeram sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido(a) o(a) candidato(a) aprovado pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo(a) Professor(a) Doutor(a) **Daniel Souza**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, ao vigésimo sétimo dia do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e três.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Souza, Professor do Magistério Superior**, em 27/02/2023, às 16:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Lemos Rossi, Usuário Externo**, em 27/02/2023, às 16:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Demóstenes Ferreira Filho, Professor do Magistério Superior**, em 27/02/2023, às 16:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Kléber Mendes De Figueiredo, Professor do Magistério Superior**, em 27/02/2023, às 16:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3528147** e o código CRC **AF2D9067**.

Referência: Processo nº 23070.002963/2023-14

SEI nº 3528147

Weslei Rodrigues Niz

INFLUÊNCIA DA TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE NA REGULARIDADE DO PROCESSO MIG/MAG POR CURTO-CIRCUITO

Tese de mestrado apresentada no Programa de Pós-Graduação *Stricto sensu* em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.
Área de Concentração: Ciências Mecânicas.
Orientador: Daniel Souza.
Coorientador: Demostenes Ferreira Filho.

Tese defendida e aprovada em 27 de fevereiro de 2023, pela seguinte

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Daniel Souza
Orientador

Prof. Dr. Demostenes Ferreira Filho
Coorientador

Prof. Dr. Kléber Mendes de Figueiredo
Convidado 1

Prof. Dr. Marcelo Lemos Rossi
Convidado 2

Goiânia

2022

*Aos profissionais da educação e ciência, seu trabalho
é importante e necessário.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores Daniel e Demostenes pelas explicações e pela orientação.

Agradeço ao professor Marcelo Lemos Rossi pela implementação do programa usado nas análises dos sinais coletados nos experimentos.

Agradeço aos colegas Gustavo e Vitoria pelo auxílio nas atividades do laboratório.

Agradeço a toda minha família pelo apoio.

Agradeço ao Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela bolsa concedida durante os anos do curso.

*” (...) quanto mais observamos os fenômenos da soldagem, mais surpresas surgem
 (...)”*

*Américo Scotti,
Vladmir Ponomarev,
Soldagem MIG/MAG.*

RESUMO

O presente trabalho investiga os efeitos da taxa de subida da corrente (ajuste da indutância da fonte) na regularidade do processo de soldagem MIG/MAG operando no modo curto-circuito. Para isto, inicialmente o ajuste do efeito indutivo da fonte foi variado mantendo-se a tensão de regulagem e a velocidade de alimentação constantes. Utilizando um índice de regularidade calculado a partir dos sinais de tensão e de corrente, o Critério Laprosolda para Estabilidade de Transferência em MIG/MAG com curto-circuito, o melhor ajuste do efeito indutivo foi determinado. Depois, fixou-se o valor do efeito indutivo (taxa média de subida da corrente) e variou-se a tensão de soldagem com a velocidade de alimentação mantida constante. Todos os ensaios foram realizados com 3 gases de proteção com diferentes porcentagens de CO₂ (100% Ar, Ar+25%CO₂, 100% CO₂). Como resultado da análise dos dados foi possível encontrar a faixa de valores para a taxa de subida da corrente e tensão de soldagem onde o processo opera com maior regularidade. Os resultados mostram que o gás de proteção influencia na correlação entre a tensão de soldagem, taxa de subida da corrente e a regularidade do processo. Após encontrar a faixa de valores onde o processo é mais regular, foram feitos experimentos para tentar relacionar a regularidade com a geração de respingos (rendimento de deposição), a geração de respingos teve uma tendência contrária ao da regularidade, o melhor rendimento de deposição foi com 100% CO₂, seguido pelo 100% Ar e o pior rendimento de deposição foi com Ar + 25% de CO₂.

Palavras-chaves: indutância, curto-circuito, soldagem MIG/MAG, regularidade

ABSTRACT

The present work investigates the effects of the current rise rate (power source inductance adjustment) on the regularity of the MIG/MAG welding process operating in short-circuit mode. For this, initially the adjustment of the inductive effect of the power source was varied, keeping the regulation voltage and the supply speed constant. Using a regularity index calculated from the current voltage signals, the best fit of the inductive effect was determined. Then, the value of the inductive effect (average rate of current rise) was fixed and the welding voltage was varied with the feed speed kept constant. All tests were performed with 3 shielding gases with different percentages of CO₂ (100% Ar, Ar+25%CO₂, 100% CO₂). As a result of the data analysis, it was possible to find the range of values for the rate of rise of welding current and voltage where the process operates with greater regularity. Preliminary results show that shielding gas influences the correlation between welding voltage, current rise rate and process regularity. After finding the range of values where the process is more regular, experiments were carried out to try to relate regularity with the generation of spatter, the generation of spatter had a tendency contrary to that of regularity, the best performance was with 100% CO₂, followed by 100% Ar and the worst mass yield were Ar + 25% CO₂.

Keywords: inductance, short circuit, MIG/MAG welding, regularity

LISTA DE FIGURAS

1. FIGURA 2.1: FIGURA INDICANDO OS PRINCIPAIS ELEMENTOS DO PROCESSO (GASES, FONTE, TOCHA, ALIMENTADOR DE ARAME E ETC)..... 7
2. FIGURA 2.2: OSCILOGRAMAS TÍPICOS DE TENSÃO E DE CORRENTE DURANTE A TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO EM FUNÇÃO DO COMPORTAMENTO DA GOTA EM CRESCIMENTO E DESTACAMENTO..... 8
3. FIGURA 2.3: ENCONTRO DAS CURVAS ESTÁTICAS DE FONTE E DE ARCO..... 14
4. FIGURA 2.4: TIPOS DE FONTES DE ENERGIA CONVENCIONAIS USUAIS PARA SOLDAGEM. 16
5. FIGURA 2.5: ENCONTRO DAS CURVAS ESTÁTICAS DE FONTE E DE ARCO. SENDO (A) CORRENTE CONSTANTE E (B) TENSÃO CONSTANTE. 17
6. FIGURA 2.6: ENCONTRO DAS CURVAS ESTÁTICAS DE FONTE E DE ARCO. SENDO (A) CORRENTE CONSTANTE E (B) TENSÃO CONSTANTE. 18
7. FIGURA 2.7: ESQUEMA DOS TEMPOS DE CURTO-CIRCUITO E DE ARCO ABERTO E PERÍODO DE CURTO-CIRCUITO..... 21
8. FIGURA 2.8: HISTOGRAMA COM OS TEMPOS DE CURTO-CIRCUITO, À DIREITA CURTOS NORMAIS, À ESQUERDA CURTOS INCIPIENTES..... 22
9. FIGURA 3.1: MEDIÇÕES FEITAS NOS COMPRIMENTOS DE ARCO PARA 100% DE AR, PARA AR MAIS 25% DE CO₂ E PARA 100% CO₂. 25
10. FIGURA 3.2: ESQUEMA MOSTRANDO O PASSO A PASSO DO EXPERIMENTO. (A -

CHAPAS CORTADAS; B - CHAPAS LIMPAS E LIXADAS; C – CHAPAS SOLDADAS; D – CHAPAS LIMPAS E PESADAS).	28
11. FIGURA 4.1: TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE EM FUNÇÃO DO AJUSTE DO EFEITO INDUTIVO PARA 100% DE AR.	29
12. FIGURA 4.2: TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE E AJUSTE DO EFEITO INDUTIVO PARA O AR MAIS 25% DE CO2.	29
13. FIGURA 4.3: TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE E AJUSTE DO EFEITO INDUTIVO PARA 100% DE CO2.	29
14. FIGURA 4.4: RELAÇÃO ENTRE A CORRENTE MÉDIA DE PICO E A TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE PARA 100% DE AR.	30
15. FIGURA 4.5: RELAÇÃO ENTRE A CORRENTE MÉDIA DE PICO E A TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE PARA AR MAIS 25% DE CO2.	31
16. FIGURA 4.6: RELAÇÃO ENTRE A CORRENTE MÉDIA DE PICO E A TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE PARA 100% DE CO2.	31
17. FIGURA 4.7: RELAÇÃO ENTRE O TEMPO DE CURTO-CIRCUITO E A TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE PARA 100% DE AR.	32
18. FIGURA 4.8: RELAÇÃO ENTRE O TEMPO DE CURTO-CIRCUITO E A TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE PARA AR MAIS 25% DE CO2.	32
19. FIGURA 4.9: RELAÇÃO ENTRE O TEMPO DE CURTO-CIRCUITO E A TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE PARA 100% DE CO2.	33
20. FIGURA 4.10: RELAÇÃO ENTRE A FREQUÊNCIA E A TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE PARA 100% DE AR COM TENSÃO DE REGULAGEM DE 20 V.	33
21. FIGURA 4.11: RELAÇÃO ENTRE A FREQUÊNCIA E A TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE	

PARA AR MAIS 25 % DE CO2 COM TENSÃO DE REGULAGEM DE 22 V.....	34
22. FIGURA 4.12: RELAÇÃO ENTRE A FREQUÊNCIA E A TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE PARA 100 % CO2 COM TENSÃO DE REGULAGEM DE 24 V.	34
23. FIGURA 4.13: RELAÇÃO ENTRE A FREQUÊNCIA E A TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE PARA 100% DE AR COM TENSÃO DE REGULAGEM DE 18 V.	35
24. FIGURA 4.14: RELAÇÃO ENTRE A FREQUÊNCIA E A TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE PARA AR MAIS 25% DE CO2 COM TENSÃO DE REGULAGEM DE 20 V.....	36
25. FIGURA 4.15: RELAÇÃO ENTRE A FREQUÊNCIA E A TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE PARA 100% CO2 COM TENSÃO DE REGULAGEM DE 22 V.	36
26. FIGURA 4.16: RELAÇÃO ENTRE A FREQUÊNCIA E A TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE PARA 100% DE AR COM TENSÃO DE REGULAGEM DE 17 V.....	37
27. FIGURA 4.17: RELAÇÃO ENTRE A FREQUÊNCIA E A TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE PARA AR MAIS 25% DE CO2 COM TENSÃO DE REGULAGEM DE 19 V.....	38
28. FIGURA 4.18: RELAÇÃO ENTRE A FREQUÊNCIA E A TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE PARA 100% DE CO2 COM TENSÃO DE REGULAGEM DE 21 V.....	38
29. FIGURA 4.19: RELAÇÃO ENTRE A FREQUÊNCIA E A TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE PARA 100% DE AR.....	39
30. FIGURA 4.20: RELAÇÃO ENTRE A FREQUÊNCIA E A TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE PARA AR E 25% DE CO2.....	39
31. FIGURA 4.21: RELAÇÃO ENTRE A FREQUÊNCIA E A TAXA DE SUBIDA DA CORRENTE PARA 100% DE CO2.....	39
32. FIGURA 4.22: RELAÇÃO ENTRE A FREQUÊNCIA E TENSÃO MÉDIA DE OPERAÇÃO PARA 100% DE AR.....	40

33. FIGURA 4.23: RELAÇÃO ENTRE A FREQUÊNCIA E TENSÃO MÉDIA DE OPERAÇÃO PARA AR MAIS 25% DE CO2.....	41
34. FIGURA 4.24: RELAÇÃO ENTRE A FREQUÊNCIA E TENSÃO MÉDIA DE OPERAÇÃO PARA 100% DE CO2.....	41
35. FIGURA 4.25: GRÁFICO DA REGULARIDADE PELA TENSÃO MÉDIA DE SOLDAGEM PARA 100% DE AR, PARA AR MAIS 25% DE CO2 E PARA 100% CO2.	42
36. FIGURA 4.26: GRÁFICO DA REGULARIDADE PELO RENDIMENTO DE DEPOSIÇÃO (%) PARA 100% DE AR, PARA AR MAIS 25% DE CO2 E PARA 100% CO2.....	43

LISTA DE TABELAS

1. TABELA 2.1 - PROPRIEDADES DOS GASES DE PROTEÇÃO MAIS COMUNS (EM COMPARAÇÃO COM OS GASES ATMOSFÉRICOS)..... 9
2. TABELA 3.1 - VALORES UTILIZADOS PARA FAZER O EXPERIMENTO..... 24
3. TABELA 3.2 - VALORES UTILIZADOS PARA FAZER O EXPERIMENTO..... 26
4. TABELA 4.1: VALORES DE MASSA MEDIDOS ANTES E DEPOIS DA SOLDAGEM... 42

LISTA DE SÍMBOLOS

Sobrescritos

ks Efeito indutivo da fonte

Letras Gregas

σ Delta minúsculo,

Φ Phi maiúsculo,

Letras Latinas

#

Operadores

A Amper

V Voltagem

I Corrente

Siglas

MIG/MAG *Metal inert gas, metal active gas*

GMAW *Gas metal arc welding*

CMT *Cold Metal Transfer*

RMD *Regular Metal Deposition*

min Minutos

CO Monóxido de carbono

CO₂ Dióxido de carbono

O ₂	Oxigênio
He	Hélio
H ₂	Hidrogênio
N ₂	Nitrogênio
Ar	Argônio
DBCP	Distancia de bico à peça
P _{cc}	Período de curto-circuito
t _{ab}	Tempo de arco aberto
t _{cc}	Tempo de curto-circuito
f _{cc}	Frequência de curto circuito
k _{cc}	fração de tempo de curto-circuito num ciclo total de transferência
U _{ref}	Tensão de referência para arco aberto
U _a	Tensão de soldagem
IV _{cc}	Índice Vilarinho de regularidade
σ _{tcc}	Desvio padrão do tempo de curto-circuito
σ _{t_{ab}}	Desvio padrão do tempo de arco aberto
F _{cc}	Frequência de corte
V _{alim}	Velocidade de alimentação do arame eletrodo
d	Diâmetro do eletrodo
Φ _g	Valores máximos e mínimos de diâmetro adequado da gota
CEF	Característica estática da fonte

CEA Característica estática do arco

Subscritos

s Segundos

l Litros

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICAS.....	5
2.1. PROCESSO MIG/MAG.....	5
2.1.1. TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO.....	6
2.1.2. GASES DE PROTEÇÃO.....	8
2.1.3. TENSÃO E CORRENTE DE SOLDAGEM.....	11
2.1.4. CORRENTE DE TRANSIÇÃO.....	12
2.1.5. DISTÂNCIA BICO DE CONTATO-PEÇA (DBCP).....	13
2.2. CARACTERÍSTICAS E TIPOS DE FONTES PARA SOLDAGEM.....	14
2.2.1. CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS DA FONTE.....	15
2.3. INDUTÂNCIA.....	18
2.4. ESTABILIDADE DO PROCESSO DE SOLDAGEM OPERANDO NO MODO POR CURTO-CIRCUITO.....	19
2.4.1. ÍNDICES DE ESTABILIDADE.....	19
2.4.2. CRITÉRIO DE ESTABILIDADE LAPROSOLDA/UFU.....	22
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	24

3.1. MATERIAIS	24
3.2. METODOLOGIA.....	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5. CONCLUSÕES	47
6. TRABALHOS FUTUROS	47
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

1. INTRODUÇÃO

Soldagem MIG/MAG é um processo de soldagem muito utilizado na indústria, com uma ampla gama de implementações, pode ser utilizado na fabricação de peças pequenas e na montagem de grandes estruturas. Neste processo de soldagem é utilizado um gás, que pode ser ativo ou inerte, como proteção contra os gases da atmosfera. O eletrodo, na forma de arame, é adicionado de forma contínua e suas principais formas de operação são por goticular (*spray*), globular e por curto-circuito, modo abordado nesse trabalho.

Na transferência por curto-circuito a gota de metal fundido na ponta do arame eletrodo encosta na poça de soldagem, transferindo metal para poça e causando um curto-circuito, levando a uma subida brusca da corrente ocasionando o rompimento do arame e a reabertura do arco. O metal fundido é transferido para a poça de fusão por tensão superficial e pelo efeito *pinch*, estes fatores também estão associados ao desprendimento da gota. Por operar com baixa energia de soldagem, o modo curto-circuito é muito utilizado para soldagem de chapas finas e soldagem na posição sobre-cabeça.

Dentre os parâmetros que influenciam a soldagem no modo curto-circuito estão o gás de proteção utilizado, a tensão e a corrente de soldagem, bem como a indutância; taxa de crescimento da corrente durante o curto-circuito. Este último fator é de interesse apenas para soldagens feitas por curto-circuito e apesar de sua influência na qualidade do cordão ser conhecida na literatura, é pouco considerada na indústria. Trabalhos anteriores mostram a importância da indutância na regularidade do processo operando em curto-circuito (BULLE. 2017; REZENDE et al. 2011; SOUZA, et al.2011_A).

Neste trabalho estes fatores serão avaliados para determinar a melhor condição de regularidade de transferência metálica, essa resposta será avaliada utilizando o índice de Vilarinho de regularidade de transferência por Curto-circuito (SOUZA, et al.2009; REZENDE et al. 2011), uma metodologia criada no laboratório Laprosolda/UFU que mede a regularidade da transferência metálica por curto-circuito. Melhores regularidades de transferência não se traduzem necessariamente em melhores condições para a transferência de metal, estas dependem dos parâmetros de soldagem bem como do gás de proteção utilizado. (SOUZA 2013; DUTRA 2008)

Por fim, o objetivo deste trabalho é aprimorar o entendimento de como a variação da taxa de subida da corrente durante o curto-circuito afeta a regularidade de transferência metálica

do processo, levando em consideração a tensão de soldagem e o teor de CO₂ no gás de proteção, bem como avaliar a relação entre o critério de regularidade e a geração de respingos, que é um indicativo da estabilidade do processo.

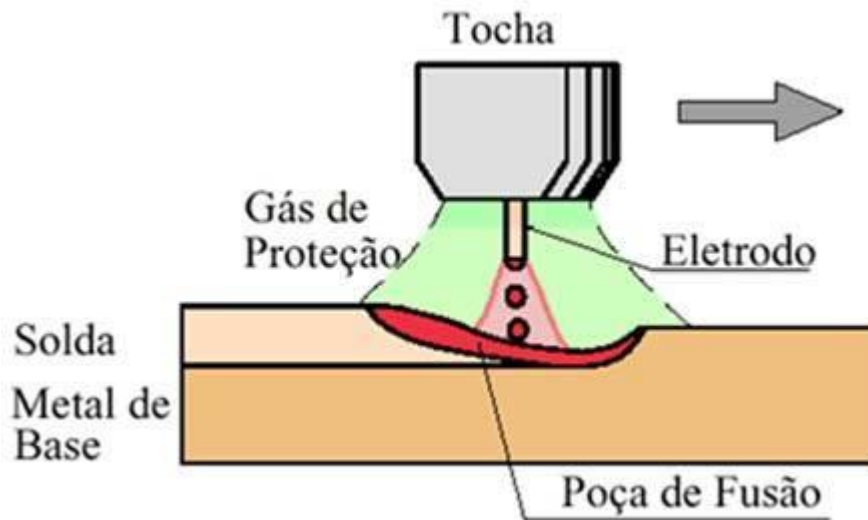
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente tópico apresenta a revisão bibliográfica acerca do tópico soldagem MIG/MAG, indutância e regularidade da transferência metálica. São mostrados seus principais parâmetros operacionais bem como os tipos de gases, tipos de fontes de soldagem utilizados, será explicado o efeito da indutância na soldagem bem como a métrica utilizada para determinar a estabilidade do processo MIG/MAG por curto circuito.

2.1. Processo MIG/MAG

Processo de soldagem MIG/MAG ou GMAW é o nome que se dá ao processo de soldagem a arco elétrico de eletrodo não revestido consumível com proteção gasosa. MIG significa Metal Inert Gas e MAG Metal Active Gas, sendo GMAW, Gas Metal Arc Welding, uma nomeação genérica para os dois processos. No processo de soldagem no modo convencional os parâmetros regulados são tensão de regulagem e velocidade de alimentação. Neste processo é utilizado um eletrodo em forma de arame alimentado de maneira automática ou semiautomática até o bico de contato, como visto na Figura 2.1, sendo um processo versátil e de fácil implementação em robôs. O metal fundido pelo arco elétrico se deposita na peça formando a poça de fusão que é protegida de atmosfera pelo gás de proteção escolhido. É amplamente utilizado na indústria pela sua alta capacidade de produção, devido à alimentação contínua do arame e alto valor de densidade de corrente (100 - 250 A/mm²) que proporciona maior taxa de fusão.

Figura 2.1: Figura indicando os principais elementos do processo (gases, fonte, tocha, alimentador de arame e etc.)

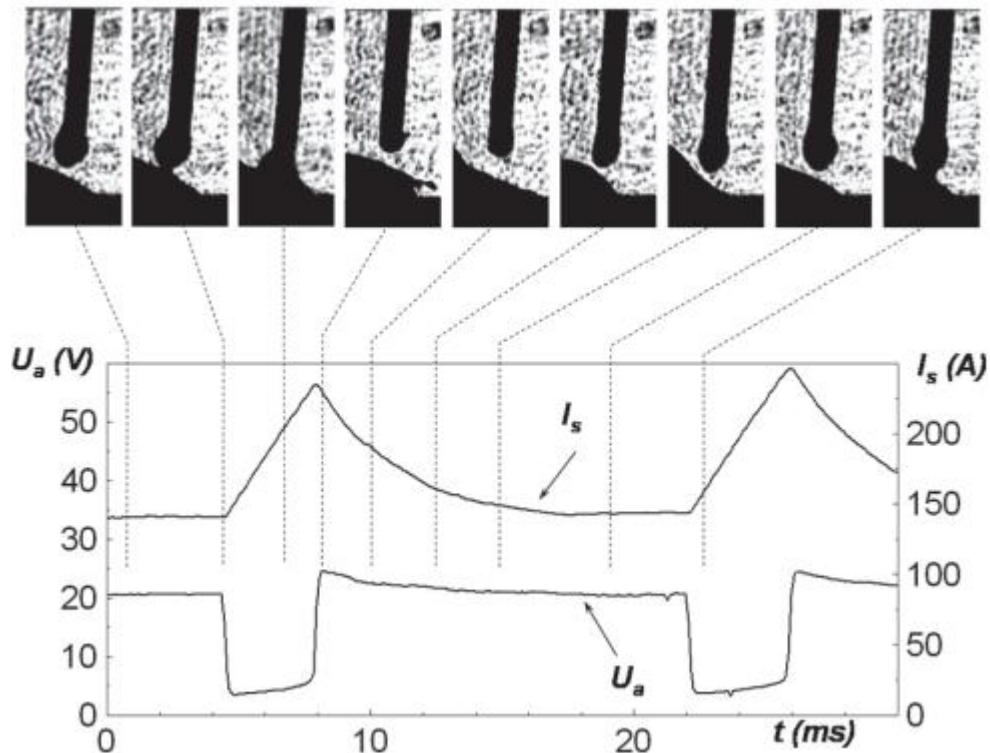


Fonte: <https://shortest.link/liGN>

2.1.1. TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO

Transferência por curto-circuito é o modo de transferência metálica que ocorre quando a ponta líquida do arame-eletrodo toca a poça de fusão, causando um curto-circuito e a extinção do arco, e, por ação da tensão superficial, o metal da ponta é transferido para a poça. A energia de soldagem para essa modalidade é baixa, produzindo uma solda de baixa penetração e solidificação rápida. A corrente e tensão baixa causam baixa força eletromagnética permitindo arcos curtos o suficiente para que a gota toque a poça antes de se destacar. A frequência de transferência por curto-circuito é de 20 a 200 vezes por segundo (SCOTTI E PONOMAREV, 2008), seguindo as etapas mostradas na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Oscilogramas típicos de tensão e de corrente durante a transferência por curto-circuito em função do comportamento da gota em crescimento e destacamento.



Fonte :Scotti e Ponomarev, 2008

Primeiro há o estágio de crescimento da gota na ponta do arame. Nesse estágio que se segue após o rompimento do curto circuito, o tamanho do arco cresce rapidamente e segundo Scotti e Ponomarev (2008, p.135), dependendo das configurações de tensão de soldagem e indutância, o arco pode se tornar tão longo que permitiria até a passagem ocasional de gotas em voo livre.

Em seguida a gota toca a poça de fusão fazendo a tensão cair bruscamente e subir a corrente. Nesse instante a principal força que age sobre a gota é a tensão superficial, além do efeito Pinch, que é causado pelas componentes da força eletromagnética, tende a separar o elemento de seção transversal maior de um elemento de seção transversal menor (SCOTTI E PONOMAREV, 2008). O componente radial da força eletromagnética tende a comprimir a área de contato e o componente, a componente axial tende a empurrar a gota para cima atuando contra a transferência, esta componente tem menor intensidade (CAMARGO et al., 2016).

A gota começa a ser transferida por tensão superficial e a ponte formada entre a gota e

a poça começa a se romper ao final do curto-circuito. Com o aumento da corrente e diminuição da seção transversal aumenta também o efeito pinch (CAMARGO et al., 2016), facilitando a transferência da gota para a poça, essa alta corrente em uma seção transversal pequena provoca um aquecimento súbito que colabora para seu rompimento. Processos controlados de soldagem como o CMT (Cold Metal Transfer) e o RMD (Regular Metal Deposition) entre outros são muito utilizados por manter as características de uma solda por curto-circuito e reduzir os inconvenientes de um processo de soldagem convencional, como a alta geração de respingos, como mostra (COSTA, et al., 2012).

O ponto onde a corrente chega ao maior valor, ocorre o rompimento da ponte metálica e queda da corrente. Esse rompimento, considerando um valor baixo de indutância, pode ocorrer de forma violenta liberando muitos respingos (SOUZA et al., 2011_B). Se o valor de indutância for muito alto, a gota sofre menos ação das forças que provocam a separação, podendo fazer com que o arame entre na poça de fusão, interrompendo o processo de soldagem. Um equilíbrio do valor da indutância deve ser encontrado para que a soldagem ocorra minimizando os respingos (CAMARGO et al., 2016; JORGE et al., 2021). Após a formação do arco a tensão e corrente voltam a valores de regime e começa a formação de uma nova gota de solda com o arco aberto. Indutância é a propriedade de um circuito elétrico de se opor à mudança de corrente elétrica, essa taxa de crescimento da corrente é medida em A/s.

2.1.2. GASES DE PROTEÇÃO

Gases de proteção são gases injetados na região da soldagem, tem a função de proteger a solda contra o ar atmosférico além de estabilizar o arco de soldagem e influenciar na geometria e qualidade da solda (FERNANDES et al., 2010). As propriedades básicas dos gases de proteção são o potencial de ionização, condutividade térmica, dissociação e recombinação, potencial de oxidação e a densidade do gás.

A capacidade de um sistema de proteger a poça de soldagem dos gases da atmosfera é chamada de eficiência de proteção. Esta característica depende não somente do gás, mas do fluxo utilizado e bocal de soldagem. Como regra prática é utilizado vazão em l/min de 10x o diâmetro do arame, sendo o fluxo adequado de 10 a 16 l/min, o maior valor de fluxo deve ser utilizado para valores elevados de corrente. Valores acima dos citados causam turbulência no

fluxo de gás, que deve ser evitada para não causar ineficiência na solda e inclusão de elementos contaminantes (SCOTTI E PONOMAREV, 2008).

Gases de proteção são necessários para proteção da poça e gotas de metal líquido contra elementos nocivos presentes no meio ambiente, como o nitrogênio, elemento mais presente na atmosfera. Nos aços ao carbono da baixa liga e no alumínio e suas ligas formam-se nitretos, elementos fragilizantes (TATAGIBA et al., 2012). O oxigênio tem grande reatividade com elementos presentes no metal de base. Aços carbonos tem grande facilidade de se combinar com o oxigênio e formar bolhas de CO e CO₂, se presas no cordão de solda depois da solidificação formam porosidades (PESSOA, 2007). Com outros elementos presentes nas ligas de aço o oxigênio forma óxidos sólidos que podem agir como nucleantes de microestruturas (desejáveis ou não) ou serem pontos fragilizantes (PESSOA, 2007). O hidrogênio, apesar de em menor quantidade no ar, também pode formar poros em alumínio e ficar aprisionado e criar tensões em aços, por ter grande solubilidade nos metais enquanto líquidos.

Os gases de proteção são classificados como inertes e ativos. Os gases inertes não reagem quimicamente com o metal de solda, sendo o argônio e hélio os mais comercialmente usados, gases que apresentam reatividade com o metal de solda são classificados como ativos, sendo o CO₂, O₂ os mais utilizados.

Uma propriedade do gás que é importante para a soldagem é a sua densidade relativa à densidade da atmosfera. Gases, ou misturas, mais densas têm maior facilidade de proteger a solda feita na posição plana, sendo necessário utilizar uma maior vazão para gases de densidades mais baixas, como o hélio. Essa condição se inverte para soldagens feitas fora da posição plana, na posição sobrecabeça quanto menor a densidade maior será a eficiência de proteção. Nas posições horizontais e verticais a densidade não favorece a proteção, sendo recomendado aumentar a vazão um pouco acima do recomendado (TATAGIBA et al., 2012).

A estabilidade de arco também é função dos gases de proteção e está vinculada às propriedades físico-químicas dos gases, citadas na Tabela 2.1. As principais são condutividade térmica, potencial de oxidação e potencial de ionização. O potencial de ionização é a energia necessária para retirar um ou mais elétrons da camada de valência do átomo, um gás ionizado conduz eletricidade. Esta propriedade influencia tanto a abertura do arco quanto a estabilidade (GUAN et al., 2019). O gás argônio, com baixo potencial de ionização, apresenta maior facilidade para abertura do arco e maior estabilidade do que o hélio, maior potencial de ionização.

Tabela 2.1 - Propriedades dos gases de proteção mais comuns (em comparação com os gases atmosféricos).

Gás	Símbolo químico	Peso molecular	D (Kg/m³)	PI (eV)	CT (mW/mK)	Cv (k/kg°C)
Argônio	Ar	39,9	1,78	15,8	16,4	0,314
Dióxido de carbono	CO ₂	44,0	1,98	14,4	14,7	0,657
Hélio	He	4,0	0,18	24,6	142,6	3,11
Hidrogênio	H ₂	2,1	0,07	16,5	168,3	10,17
Nitrogênio	N ₂	28,0	1,16	14,5	24	0,742
Oxigênio	O ₂	32,0	1,33	13,2	24,2	0,653

Fonte: Produzido pelos autores.

Os gases de proteção são constituídos por moléculas de dois ou mais átomos (CO₂, O₂ e H₂) que se dissociam em seus componentes atômicos, devido às altas temperaturas, antes de serem ionizados, consumindo assim mais energia do que gases monoatômicos. Gases de proteção em contato com a poça durante a soldagem se recombinam e liberam energia nesse ponto, afetando a formação do cordão (HIRATA et al., 2014).

Alta capacidade de troca de calor favorece a fusão na poça, com maior troca de calor com o meio ou com a chapa a ser soldada, gases como o He, CO₂ e H₂ têm maior capacidade de conduzir calor. Quanto maior a capacidade de troca de calor maior a tensão necessária para manutenção do arco (BOHRER, 2013).

Um alto poder de oxidação é maléfico para ligas de metais reativos durante a solda (TATAGIBA, 2012), neste caso são utilizados gases inertes como o Argônio ou Hélio. A presença de uma camada de óxidos sobre a poça é uma condição necessária para a estabilidade do arco (SCOTTI E PONOMAREV, 2008). Metais reativos sempre tem essa camada de óxidos durante a soldagem, não tendo problemas com estabilidade. Metais menos reativos como os aços demandam gases ativos para obter arcos estáveis. Os gases H₂ e N₂ agem como gases

inertes, por seus íons apresentarem ação redutora.

A reatividade dos gases de proteção causa porosidades e fragilização na solda, similarmente a soldagem executada com falta de proteção, mas em menor escala, uma vez que as concentrações dos gases reativos podem ser controladas. Os gases oxidantes podem reagir com elementos de ligas do metal durante a soldagem, o que pode acarretar em perdas significativas e influenciar a formação de escórias, a taxa de emissão de fumos e a fluidez da poça de fusão (MELLO, 2015).

Costuma-se utilizar eletrodos com elementos antioxidantes para fazer soldas com gases oxidantes. Quanto maior o teor de O_2 e CO_2 no gás de proteção maior deve ser a quantidade de desoxidante no arame. Quanto maior a quantidade de elemento desoxidante no arame (ou poder de oxidação do gás) maior a quantidade de fumo gerados (MELLO, 2015).

O poder de oxidação do gás também pode afetar o formato do cordão de solda por modificar a molhabilidade do metal fundido e o meio a sua volta. Quanto menor o potencial de oxidação menor a molhabilidade, produzindo cordões mais irregulares e convexos (SCHAFRANSKI, 2016).

Na transferência por curto circuito o gás de proteção pode influenciar no tamanho das gotas e a duração do curto circuito, alterando a estabilidade. Dutra (p. 6, 2008) mostra que para a obtenção de melhores características de soldagem por curto-circuito deve-se levar em conta o gás utilizado na regulagem dos parâmetros da fonte.

2.1.3. TENSÃO E CORRENTE DE SOLDAGEM

Tensão de soldagem, velocidade de alimentação do arame eletrodo, corrente de soldagem, velocidade de soldagem e vazão de gás de proteção são os principais parâmetros da soldagem, seus ajustes adequados proporcionam uma solda com qualidade. Estes parâmetros têm que ser mantidos dentro dos limites de tolerância exigidos durante a soldagem (QUINTINO et al., 2013). A realização da soldagem com um desvio de qualquer um desses parâmetros para além dos limites desejados, pode resultar em não conformidades na solda.

Contudo, a importância de cada um para o processo de soldagem MIG/MAG não é igual.

A tensão e a corrente de soldagem, além de suas principais funções (soldagem com fontes tradicionais tipo tensão constante, a variação da tensão implica na variação do tamanho do arco e a corrente de soldagem está atrelada a velocidade de alimentação do arame), influenciam a maior parte das peculiaridades do processo (visível através de seus comportamentos ao longo do tempo nas curvas de tensão e de corrente).

Cada modo de operação diferente de processo de soldagem MIG/MAG apresenta curvas características de tensão e corrente. A análise estatística desses dados é muito interessante pois fornece informações sobre as características e propriedades da fonte de energia, do cabeçote de alimentação, dos consumíveis de soldagem e até da qualidade esperada do cordão (GOMES et al., 2012). A tensão e a corrente de soldagem são tão atrativas para análise estatística, pois além de muito importantes para a soldagem, a escolha desse tipo de análise também se dá pela fácil medição dessas variáveis (CORREIA et al., 2005).

Para obter estas informações, as curvas devem ser analisadas por meio da determinação de índices específicos. Índices estatísticos embasados nos sinais elétricos produzidos. As características dinâmicas da fonte de soldagem podem ser analisadas utilizando índices como a taxa de subida e descida da corrente, bem como seus efeitos sobre o comportamento do arco. Neste estudo, para identificar a estabilidade da soldagem MIG/MAG por curto-circuito serão utilizados os oscilogramas de corrente e tensão de soldagem.

2.1.4. CORRENTE DE TRANSIÇÃO

A soldagem goticular, também chamada de *spray (ou aerossol)*, é caracterizada pelo uso de correntes e tensões de soldagem mais elevadas. A transferência metálica ocorre com pequenas gotas, próximas ao diâmetro do eletrodo, de forma sequencial e em alta frequência. A corrente mínima à qual esse fenômeno ocorre é chamada corrente de transição. A corrente de transição depende do diâmetro do arame e do gás de proteção.

Se o gás de proteção para soldar aços carbono contiver mais que cerca de 15% de dióxido de carbono (CO₂), não haverá transição de transferência globular para transferência por aerossol. (ESAB, 2008, p.68)

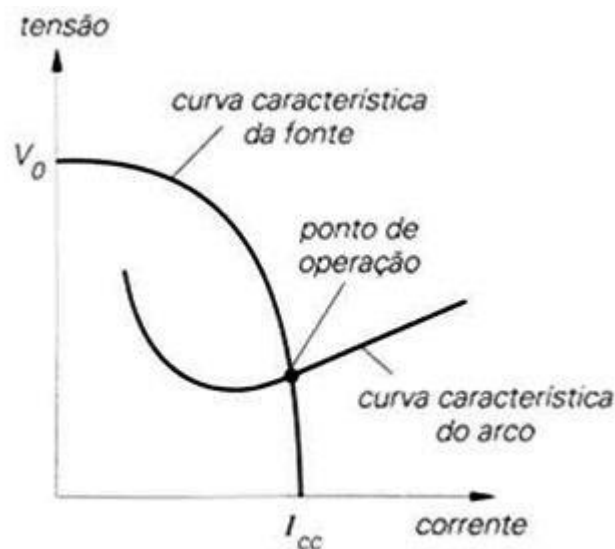
O conhecimento da corrente de transição é importante para determinação das faixas de trabalho dos modos de transferência metálica. Por exemplo, para se trabalhar no modo curto

circuito é necessário que a corrente de soldagem esteja abaixo da corrente de transição.

2.1.5. DISTÂNCIA BICO DE CONTATO-PEÇA (DBCP)

Ao usar uma fonte com característica estática do tipo tensão constante, quanto maior a velocidade de alimentação do arame, menor o comprimento do arco e maior a corrente. Com uma velocidade de alimentação adequada, de tal modo que o encontro entre o comportamento estático da fonte (CEF) e o comportamento estática do arco (CEA) determina o ponto de trabalho. Este ponto corresponde a um arco de comprimento para o qual a velocidade de fusão do arame é constante.

Figura 2.3: Encontro das curvas estáticas de fonte e de arco.



Fonte: <https://url.gratis/QqqG0y>

Um aumento da distância da tocha à peça causa o aumento momentâneo do arco, seu aumento significa um maior diâmetro do arco e maior resistência de soldagem. Uma vez que a fonte é de tensão constante (CEF) a corrente cai, ou seja, a velocidade de fusão do eletrodo diminui. A velocidade de alimentação é determinada pela rotação do motor, que não se altera uma vez regulada, tornando-se maior que a velocidade de fusão. A ponta do arame-eletrodo se aproxima da peça, reduzindo progressivamente o comprimento do arco. Essa redução é também

acompanhada de um aumento progressivo da corrente e ambos recuperam razoavelmente os valores iniciais (SCOTTI E PONOMAREV, 2008; PETRACHI, 2021).

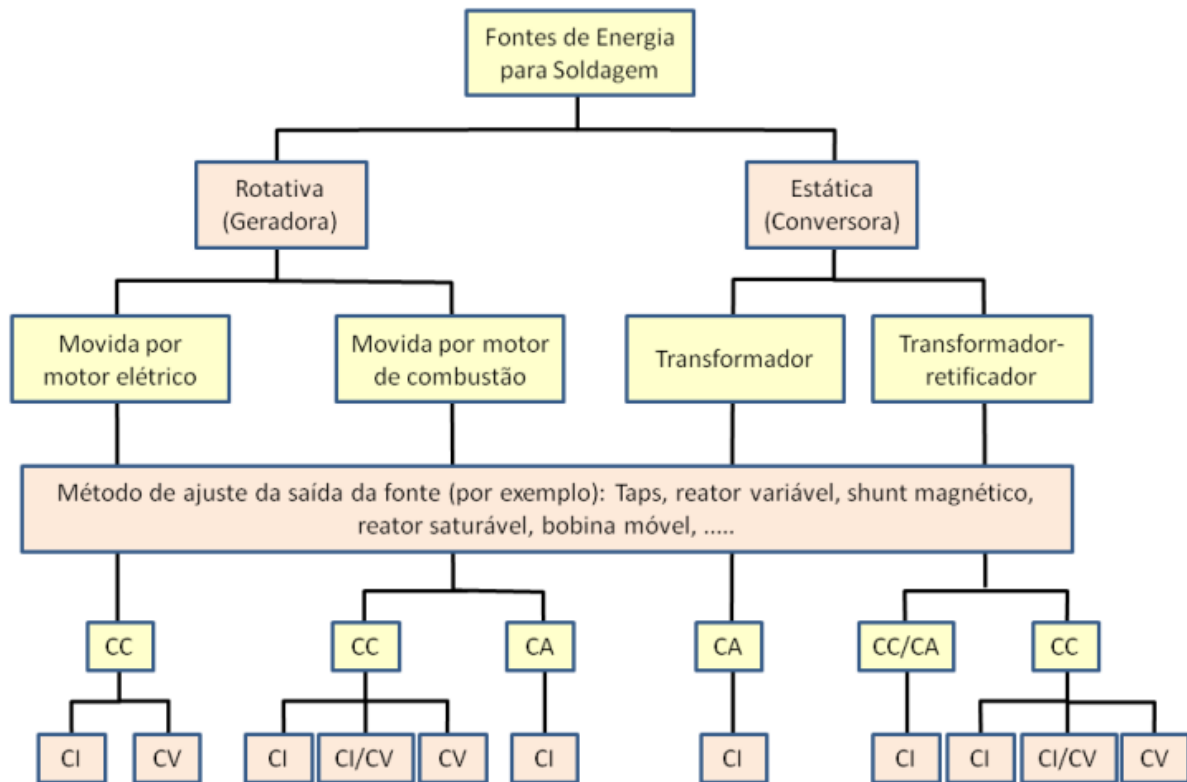
2.2. Características e tipos de fontes para soldagem

As fontes de energia influenciam bastante na qualidade e produtividade de um processo de soldagem. Sendo condição necessária para todos aqueles que desejam trabalhar com soldagem, o bom conhecimento de como as fontes operam. A função de uma fonte de soldagem é produzir, a partir da energia que recebe da rede, uma tensão, relativamente baixa, e corrente alta, que formam o arco de solda. Indutores e controles eletrônicos são utilizados para controlar a variação do sinal de saída.

Fazendo um breve histórico das fontes de soldagem temos as fontes do tipo gerador, transformador-retificador e inversor como as primeiras fontes chamadas convencionais ou eletromagnéticas. As fontes chamadas de modernas ou eletrônicas são as fontes de transformador, Transformador-Retificador (tiristor) e Inversor. Diferenciando-se pela forma de controle, os inversores usam o efeito magnético (variação da indutância), e transformadores-retificadores operam por meio da variação da potência (tiristores, transistores e etc). Algumas fontes são mostradas no esquema da Figura 2.4.

As fontes eletromagnéticas são, em geral mais resistentes, de menor complexidade e custo de manutenção (SCOTTI E PONOMAREV, 2008). Diferentes princípios magnéticos são usados para modular o sinal de saída, como os transformadores com regulagem por ferro-móvel ou por bobina móvel ou os reatores de ferro móvel ou saturável. Esta tecnologia impossibilita a regulagem dos parâmetros com a fonte em vazio, dificulta também o controle remoto como o interfaceamento com outros equipamentos e a modulação e programação da corrente e tensão de saída. Produz ainda instabilidade do sinal de saída e respostas lentas, com pouco controle sobre as características dinâmicas, a automação com esta categoria de fonte tem seus benefícios limitados (MODENESI, 2008).

Figura 2.4: Tipos de fontes de energia convencionais para soldagem (CC - corrente contínua, CA - corrente alternada, CI – curva característica corrente constante, CV - curva característica tensão constante).



Fonte: MODENESI, (2008).

Nas últimas décadas, a introdução de sistemas eletrônicos de controle e o uso da tecnologia da eletrônica de potência tem proporcionado um avanço significativo nas fontes para soldagem. Em contraste com as fontes eletromagnéticas, essa categoria permite uma regulagem mais fácil dos parâmetros, resposta dinâmica mais rápida e controlável, alta precisão e repetibilidade, controle por retroalimentação e de sequência de parâmetros (MARQUES, 2017). Fontes dessa categoria são, em geral, mais compactas e leves. Os princípios mais utilizados comercialmente são os dos tiristores e dos inversores.

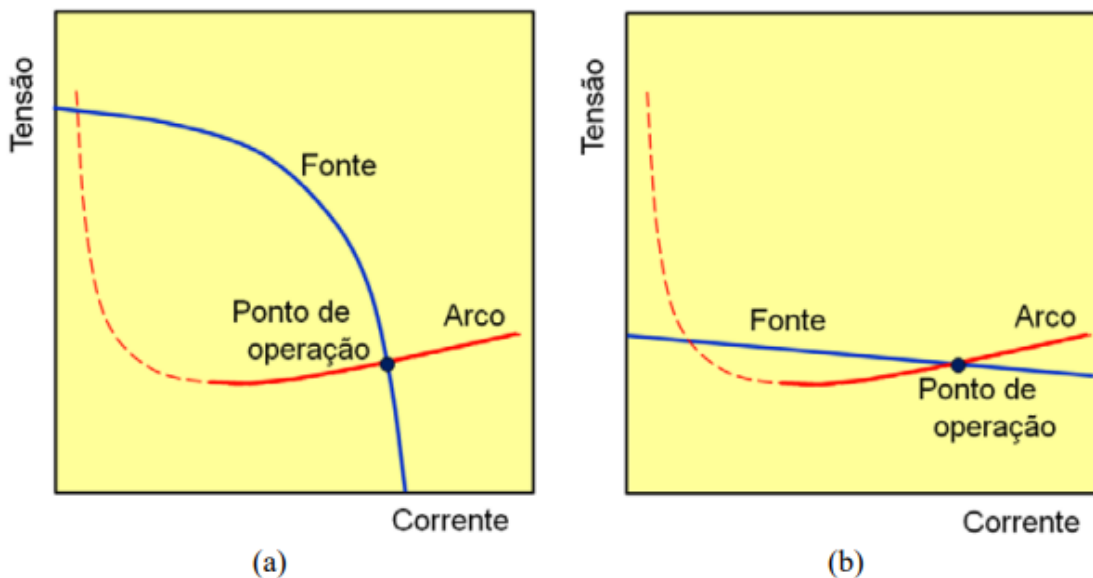
2.2.1. Características estáticas da fonte

Características estáticas da fonte (CEF) é o comportamento da fonte quando submetida

a diferentes cargas (resistivas, capacitivas ou indutivas). Este comportamento é quantificado pelos pares de ordens tensão (V) e corrente (I), a CEF de uma fonte é facilmente visualizada em gráficos de corrente por tensão. Scotti e Ponomarev (2008) explicam que a característica estática é análoga ao funcionamento de uma tomada de uma rede residencial, se ligada em vazio a tensão é de 220 V e a corrente de 0 A, mas se ligadas a equipamentos elétricos a tensão continua 220 V e a corrente sobe para suprir demanda.

A curva característica da fonte é um gráfico de tensão versus corrente com os dados do equipamento em funcionamento. Uma reta paralela ao eixo das abscissas é característica de fontes de tensão constante, onde o aumento da corrente é expressivo enquanto os valores da tensão continuam relativamente constantes. Para fontes do tipo corrente constante, o aumento da carga representa um acréscimo de tensão, gerando um gráfico com uma linha vertical. A Figura 2.5 mostra um esquema das curvas características para os dois tipos de fontes, sobrepostas com as curvas características do arco elétrico com o ponto de operação do processo.

Figura 2.5: Encontro das curvas estáticas de fonte e de arco. Sendo (a) corrente constante e (b) tensão constante.

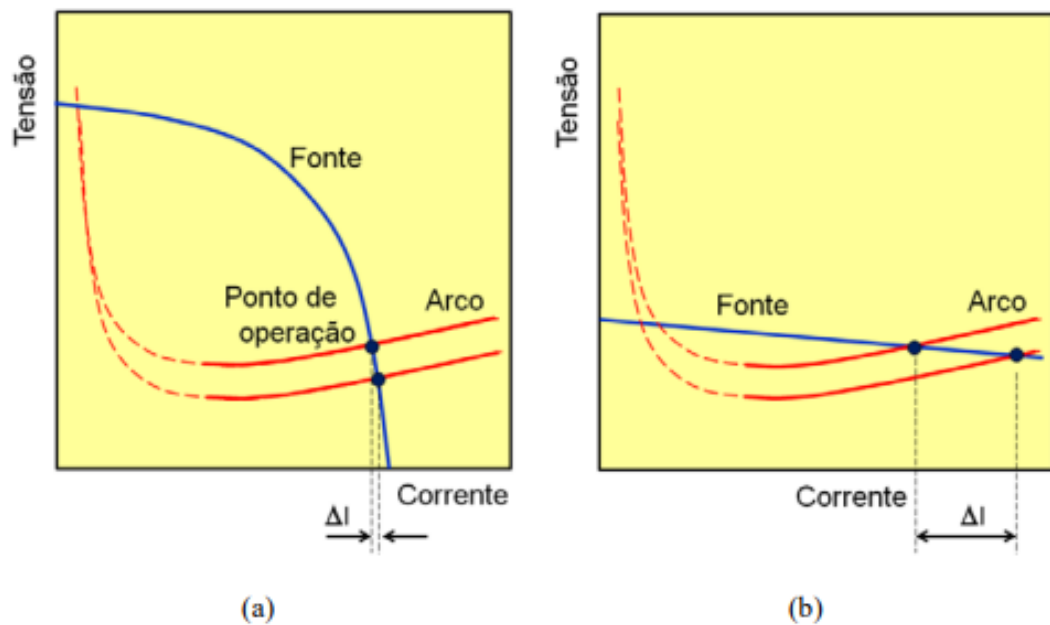


Fonte: MODENESI, (2008).

Detalhando melhor os conceitos de "tensão ou corrente relativamente constante" em fontes de soldagem, considera-se uma fonte como corrente constante quando apresenta uma

variação maior que 7V/100 A. A maioria dos procedimentos de soldagem são feitos na faixa de 20 a 30 volts, onde tensão/corrente normalmente é maior do que 20 V/100 A. Uma fonte é dita tensão constante quando apresentava variação menor do que 7 V/100 A em qualquer condição de regulagem (SCOTTI E PONOMAREV, 2008). A Figura 2.6 ilustra bem esse conceito. Variações nas tensões e nas correntes de operação são inerentes ao funcionamento de transformadores. Tensões constante; apesar de também possuírem transformadores, o controle eletrônico retroalimenta o sinal de entrada para se ter o sinal de saída constante.

Figura 2.6: Encontro das curvas estáticas de fonte e de arco. Sendo (a) corrente constante e (b) tensão constante.



Fonte: MODENESI, (2008).

Fontes reais possuem curvas diferentes de CEF, podendo existir mais de uma CEF em cada fonte. Ao se regular na fonte um determinado valor de tensão ou corrente, estamos na verdade regulando uma CEF. Esta regulagem pode ser contínua, através de manivelas e alavancas, ou por escalões, através de bornes ou chaves seletoras. No caso de fontes eletrônicas, a regulagem é sempre contínua, seja através de botões potenciométricos, seja através de entrada de valores em painéis digitais. Caso especiais, com as fontes para transferência controlada, demandam o uso de fontes com CEF do tipo corrente constante. Segundo Scotti e Ponomarev

(2008) a CEF para o processo MIG/MAG são normalmente do tipo tensão constante. Em casos especiais, como fontes para transferência controlada, demandam o uso de fontes com CEF do tipo corrente constante.

2.3. Indutância

A indutância é uma propriedade de circuitos que possuem um indutor (ou qualquer outro elemento que atue da mesma forma). A indutância age para criar uma resistência à mudança de corrente. O indutor é um dispositivo elétrico que é capaz de armazenar energia na forma de campo magnético, com a mudança da corrente o indutor produz outra corrente contrária à tendência de mudança, no sentido de evitar a variação desse campo, como resultado temos uma corrente de subida ou de descida amortecida.

O modo de transferência por curto-circuito é fortemente influenciado por algumas características do equipamento, sendo a indutância a principal delas (ULLER, 2013; SCHAFRANSKI, 2016). Esta propriedade é de extrema importância para o processo MIG/MAG quando operando no modo curto-circuito, pois uma subida brusca da corrente afeta diretamente o efeito “pinch”. Uma subida mais acentuada da corrente provoca o rompimento do cordão de solda de forma brusca, com maior instabilidade oscilações da poç a (SOUZA et al., 2011_B).

Fontes convencionais de soldagem realizam o controle da indutância por meio de um indutor ligado em série com o arco, aumentando o valor regulado para a indutância aumenta a quantidade de bobinas conectadas do indutor. Durante a soldagem é impossível saber a indutância real, a regulagem na fonte é um dos fatores que altera a indutância, condições diversas de soldagem também influenciam na indutância real (SCOTTIE PONOMAREV, 2008; SCHAFRANSKI, 2016).

Souza (2010) mostra uma relação entre o efeito indutivo e a posição regulagem da indutância para duas fontes diferentes, com escalas de regulagem diferentes. Sendo possível observar que não só o valor da taxa de subida da corrente se torna diferente para uma mesma regulagem, mas também o gradiente de variação da corrente pelo tempo. Isso demonstra que a indutância real não depende somente da regulagem na fonte. Posição reforçada por Souza et. al. (2011_A). A melhor forma de se fazer referência à indutância de um equipamento é pelo termo “efeito indutivo”, as taxas de crescimento e decrescimento da corrente, pois a indutância

do sistema não depende só da fonte, mas também do arco.

2.4. Estabilidade do processo de soldagem operando no modo por curto-circuito

Os curtos-circuitos normalmente têm uma natureza aleatória, característica facilmente identificável observando os gráficos de tensão e corrente do processo. Uma grande variação nos valores de período de curto-circuito bem como os tempos de curto-circuito e de arco aberto pode sinalizar instabilidade no processo. Uma das maiores limitações do uso da transferência por curto-circuito é a alta incidência de respingos devido à instabilidade do processo, o que faz o usuário procurar por uma estabilização maior da transferência.

Scotti e Ponomarev (2008) explicam que a estabilidade do arco e da transferência metálica governam a estabilidade do processo MIG/MAG. Com a estabilidade desses dois fatores, há também a estabilidade na distribuição de calor transferido para a solda, fazendo-se constantes a geometria do cordão de solda e as alterações metalúrgicas.

2.4.1. Índices de estabilidade

Os dois índices básicos usados para medir a regularidade de um processo de soldagem por curto-circuito são o tempo de arco aberto (t_{ab}), se refere ao tempo de duração do crescimento da gota metálica fundida na ponta do eletrodo, e o tempo de curto-circuito (t_{cc}), intervalo em que ocorre a transferência da gota fundida para a poça de fusão. Muitos índices auxiliares de transferência metálica são derivados de t_{ab} e t_{cc} , a saber:

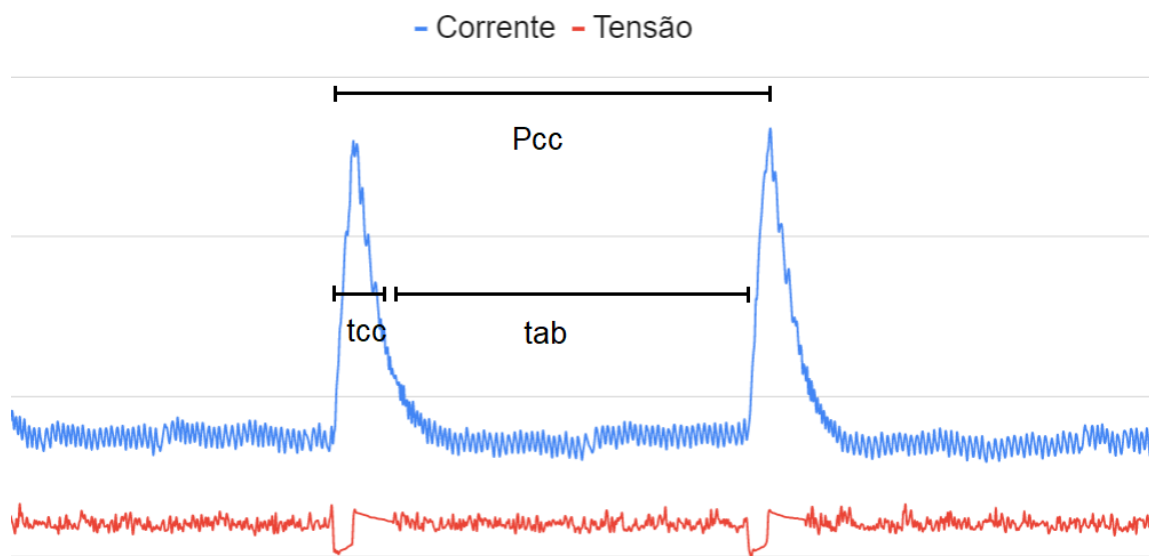
$$P_{cc} = t_{ab} + t_{cc} \quad \text{Eq. 1}$$

$$f_{cc} = \frac{1}{P_{cc}} \quad \text{Eq. 2}$$

$$k_{cc} = \frac{t_{cc}}{P_{cc}} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde o período de curto-circuito é (P_{cc}), a frequência de curto-circuito (f_{cc}) e a fração de tempo de curto-circuito num ciclo total de transferência é (k_{cc}), como mostra a Figura 2.7.

Figura 2.7: Esquema dos tempos de curto-circuito e de arco aberto e período de curto-circuito.



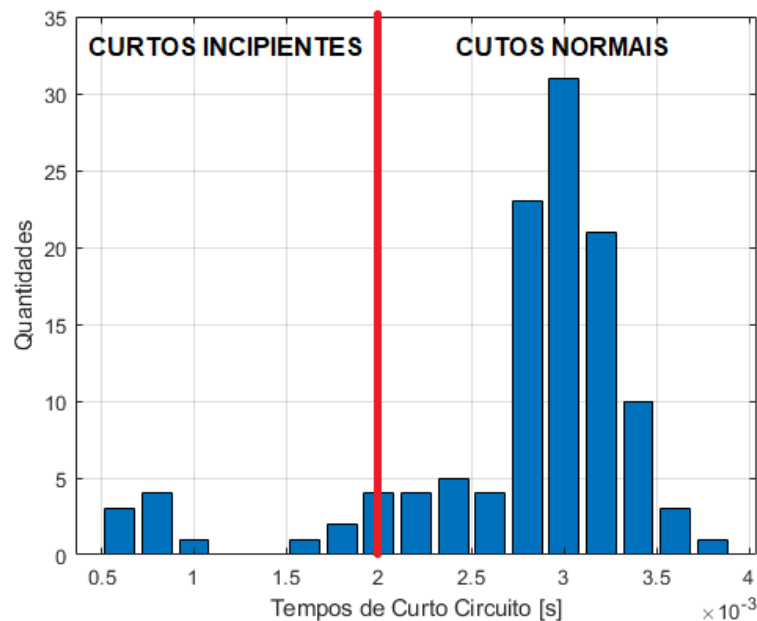
Fonte: Produzido pelos autores.

Os valores de t_{ab} e t_{cc} podem ser medidos automaticamente por rotinas computacionais com dados coletados pelos oscilogramas. Utilizando um valor de referência para a tensão de soldagem de curto-circuito (U_{refcc}), um valor superior de tensão significa arco aberto, um valor inferior significa curto-circuito. Outra maneira de determinar a U_{refcc} é através de uma análise considerando seu valor como variável, um valor para U_{refcc} é continuamente gerado pelo computador e é dado como a metade do valor da tensão média do arco aberto logo após ser medido.

É possível analisar o processo aleatório da transferência por curto-circuito utilizando histogramas de seus parâmetros, como o t_{cc} e t_{ab} , P_{cc} . Os histogramas de tempos de t_{cc} apresentam dois tipos de curto-circuitos, os incipientes (de curta duração) e os de mais longa duração, como mostra a Figura 2.8. No primeiro tipo pode não ocorrer transferência para a poça de fusão, os curtos de maior duração têm maior chance de apresentar transferência por tensão superficial. Os dois tipos de curtos, incipientes e normais, são relacionados a diferentes fenômenos que influenciam a soldagem, devendo ser examinados separadamente. Muitas vezes os histogramas de tempos de curto-circuito não mostram uma separação nítida entre os dois tipos.

Assim, para determinar se os curto-circuitos são incipientes é preciso estabelecer um tcc mínimo em que a transferência da gota ocorre, ou seja, abaixo deste valor de tcc não há transferência da gota. Rezende et al. (2011) estabeleceram, a partir da análise dos curto-circuitos, que curto-circuitos com tcc menor do que 2 ms são incipientes.

Figura 2.8: Histograma com os tempos de curto-circuito, à direita curtos normais, à esquerda curtos incipientes.



Fonte: Produzido pelos autores.

É impossível determinar as dimensões exatas da gota utilizando somente os valores de tcc e conhecendo a taxa de alimentação do arame. Pois há sempre curtos-circuitos incipientes e transferência incompleta da gota metálica para a poça.

O tcc é influenciado pelos parâmetros da soldagem. O comprimento do arco de soldagem (tensão de soldagem), bem como a corrente média de soldagem são os principais fatores que influenciam no tcc. O primeiro influencia o volume do metal líquido em transferência, quanto maior o comprimento do arco maior o seu volume.

A corrente média de soldagem é um parâmetro que depende da indutância, quanto maior a indutância do sistema, mais lentamente sobe a corrente e maior será o tcc. A temperatura da

gota de soldagem e da poça de fusão, fatores que influenciam a tensão superficial e por consequência o próprio tcc.

2.4.2. Critério de Estabilidade Laprosolda/UFU

O "Critério Laprosolda para Qualificar a Estabilidade de Transferência por Curto-circuito no Processo de Soldagem MIG/MAG", se baseia na premissa de que a estabilidade da transferência por curto-circuito está ligada com a regularidade dos tempos em curto-circuito e em arco aberto, bem como no volume adequado que cada gota deve alcançar para haver a transferência por tensão superficial. Duarte (2017) e Souza, D. et al (2009) propõem rotinas computacionais para fazer análises nos sinais de soldagem MIG/MAG por curto-circuito utilizando o critério Laprosolda.

Com tempos em curto-circuito e tempos em arco aberto sempre constantes, a transferência estará no mais alto grau de regularidade. O índice proposto para quantificar esta regularidade é o Índice Villarinho de Regularidade de Transferência (IVcc), Equação 4, quanto menor o seu valor mais regular é a transferência:

$$IV_{cc} = \frac{\sigma_{tcc}}{tcc} + \frac{\sigma_{tab}}{tab} \quad \text{Eq . 4}$$

Onde σ_{tcc} = desvio padrão da média do tempo de curto-circuito; σ_{tab} = desvio padrão da média do tempo de arco aberto, tcc = média do tempo de curto-circuito; tab =média de tempo aberto de arco aberto (considera-se tantos os curtos normais, maiores do que 2 ms, como os incipientes).

O volume adequado de cada gota que garantiria uma transferência dominada pela tensão superficial é dependente dos materiais do arame-eletrodo, gás de proteção e posição de soldagem. Pode-se ser determinada uma faixa de frequência de transferência calculada, a partir da velocidade de alimentação, diâmetro e densidade do arame, para atingir o tamanho de gota para uma transferência adequada, conforme a Equação 5:

$$F_{CC} = \frac{Valim \cdot d}{(\Phi g)^3} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde d = diâmetro do arame-eletrodo em milímetros; $Valim$ = velocidade de alimentação de arame em milímetros por segundo, Φg = valores máximos e mínimos de diâmetro adequado da gota em mm, F_{CC} = frequência de curto-circuito em Hz calculada para o valor máximo e o mínimo de diâmetro adequado da gota.

Os resultados de Rezende et al. (2011) reforçaram a premissa do Critério de Estabilidade Laprosolda, onde a estabilidade pode ser medida pelo índice Vilarinho, desde que aplicado uma restrição baseada em um corte pelo afastamento do tamanho adequado das gotas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

Para realização dos experimentos, os materiais de base utilizados foram chapas de aço carbono de 10 mm, o arame eletrodo utilizado nas soldagens foi o AWS ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro, o robô utilizado para realizar as soldagens foi o modelo Yaskawa com 6 graus de liberdade e controlador dx100 Motoman HP20D que tem como vantagem a manutenção da velocidade de soldagem e DBCP constantes durante o processo, fonte de soldagem multiprocesso IMC Digiplus A7 com central refrigeradora para resfriar a tocha de soldagem, os gases usados para soldagem (Ar, Ar + 25% CO₂ e CO₂) misturas comerciais fornecidas pela empresa White Martins.

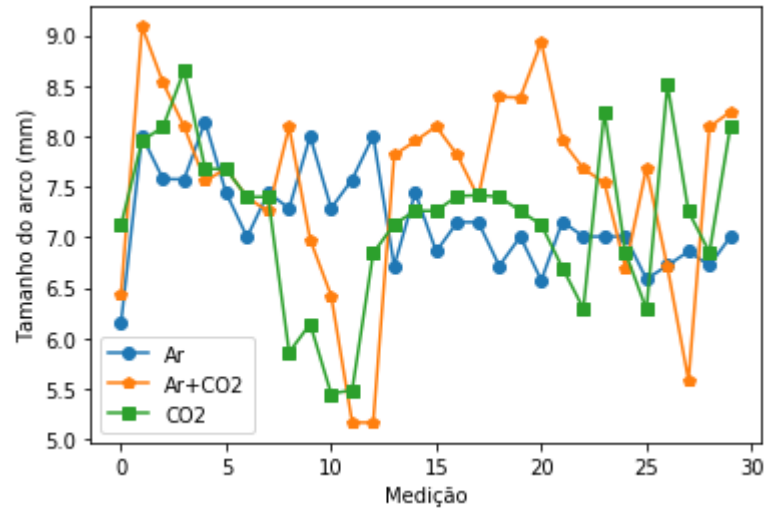
Para adquirir e avaliar os dados foram utilizados um condicionador de sinais utilizado para coleta de dados de tensão e corrente (coletados à 5 kHz). Para os cálculos dos parâmetros relativos ao índice de regularidade e cálculo do índice foram utilizados programas implementados em ambiente Python.

3.2. METODOLOGIA

Os experimentos foram feitos utilizando o robô ligado à fonte, com o valor para a distância de bico à peça (DBCP) de 12 mm. Durante os experimentos foram coletados os dados da tensão e corrente de soldagem, bem como a velocidade de alimentação do arame eletrodo.

Todos os testes foram realizados na posição plana com cordão sobre chapa. Testes preliminares foram realizados para determinar a tensão e a velocidade de alimentação em que a transferência ocorria por curto-circuito, todos os comprimentos de arco foram similares e determinados visualmente e confirmados por fotografias utilizando uma câmera de alta velocidade e, com um *software* de processamento de imagens foi possível medir os comprimentos de arco (Figura 3.1).

Figura 3.1: Medições feitas nos comprimentos de arco para 100% de Ar, para Ar mais 25% de CO₂ e para 100% CO₂.



Fonte: Produzido pelos autores.

Os dados coletados foram analisados utilizando um programa implementado em Python. Os programas utilizaram os dados de tensão e corrente durante o experimento para calcular dados relativos à soldagem, como tempo de arco aberto e tempo de curto circuito.

Para determinar uma faixa de valores ótimos para os parâmetros, foram feitos experimentos fixando os valores de tensão de soldagem, velocidade de soldagem e velocidade de alimentação e variando os valores de ajuste da indutância da fonte (ks) para os três gases com três tensões de soldagem diferentes, como mostra a Tabela 3.1. A velocidade de alimentação utilizada foi de 3 m/min e a velocidade de soldagem foi de 40 cm/min, determinados nos ensaios preliminares.

Para avaliar o funcionamento da fonte foi feita a caracterização do ks, ajuste efeito indutivo, variou-se o valor do ks desde o valor 30, sendo este identificado como menor valor, aumentando-se o valor a cada nova soldagem, os valores correspondentes de taxa de subida da corrente foram relacionados posteriormente.

Para cada experimento foi realizado um cordão de solda com comprimento aproximado de 150 mm. As tensões foram escolhidas de forma a manter um mesmo comprimento de arco para os diferentes gases utilizados (Figura 3.1). A indutância foi variada de seu valor mais baixo (ks=30) e aumentada enquanto havia transferência por curto-circuito, a mudança para a transferência mista, curto-circuito e globular, foi verificada auditivamente.

Tabela 3.1 - Valores de ajuste indutivo (ks) utilizados para fazer o experimento.

Ar			Ar + 25% CO ₂			100% CO ₂		
20 V	18 V	17 V	22 V	20 V	19 V	24 V	22 V	21 V
30	30	30	30	30	30	30	30	30
60	60	60	60	60	60	60	60	60
80	90	90	80	90	90	80	90	90
90	180	120	110	120	120	110	120	120
120	210	150	140	150	150	140	150	150
150	240	180	170	180	180	170	180	180
180	270	210	200	210	210	200	210	
200		240	230	240	240	230		
		270		270	270			

Fonte: Produzido pelos autores.

O índice de regularidade do processo foi então calculado para cada experimento onde se variou o ajuste do efeito indutivo. Assim, pode-se determinar as taxas de subida da corrente que proporcionam maior regularidade ao processo para cada gás de proteção. Os valores da regularidade foram determinados utilizando o Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência por Curto-circuito.

Utilizando as medições feitas durante os experimentos, pode-se calcular a frequência de corte, este valor permite identificar o tamanho da gota e conseqüentemente o tipo de transferência metálica. A frequência de curto-circuito é o dado utilizado para determinar se a transferência foi majoritariamente por curto-circuito puro ou mista, curto-circuito/globular.

Sabendo-se quais os valores de taxa de subida da corrente proporcionam maior regularidade para o processo, este foi fixado e a tensão de operação foi variada de valores altos (próximos à transferência no modo globular/curto-circuito) até valores muito baixos onde a operação fica visivelmente irregular, os valores regulados podem ser vistos na Tabela 3.2. Avaliando os dados coletados foi possível determinar uma faixa de valores para a tensão de operação onde tinha-se melhor regularidade.

Tabela 3.2 - Valores utilizados para fazer o experimento.

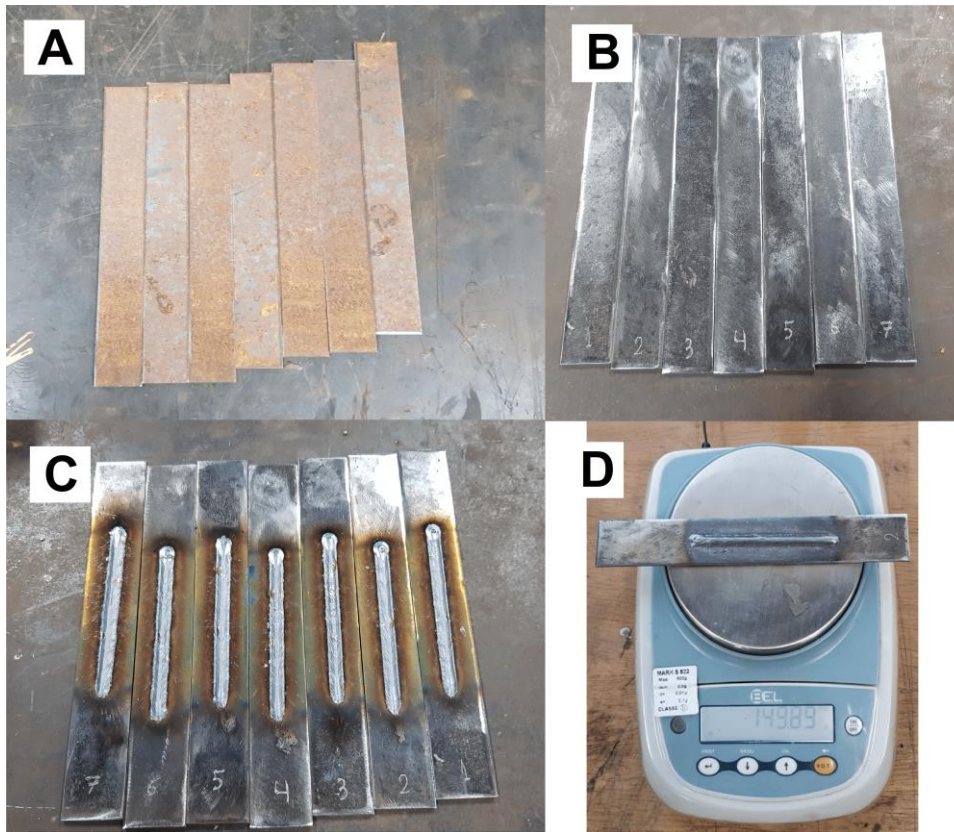
Ar			Ar + 25% CO₂			100% CO₂		
ks - 90			ks - 120			ks - 100		
19 V	15 V	11 V	21 V	17 V	13 V	22 V	18 V	14 V
18 V	14 V	10 V	20 V	16 V	12 V	21 V	17 V	13 V
17 V	13 V		19 V	15 V	11 V	20 V	16 V	12 V
16 V	12 V		18 V	14 V	10 V	19 V	15 V	11 V

Fonte: Produzido pelos autores.

Após a determinação das faixas de valores de taxa de subida da corrente e tensão de soldagem que proporcionam melhor regularidade de processo, foram realizados ensaios fazendo-se a medição de perda por respingos. Na tentativa de associar a regularidade do processo à geração de respingos, experimentos foram feitos variando os valores de efeito indutivo da fonte (ks). Foi medida a massa de material após a soldagem, utilizando a Balança de Precisão Bel S2202H com precisão de 0,01g, utilizando-se do valor da Valim, diâmetro do eletrodo e da densidade do arame estima-se o valor da massa de material fundido e compara-se com o valor de material efetivamente depositado, similar à metodologia proposta por Garcia e Scotti (p. 10, 2011).

As chapas de metal foram cortadas com dimensões de 180 x 30 mm, lixadas para retirar a oxidação, pesadas e marcadas antes da realização da soldagem, Figura 3.2. Após a soldagem a chapa foi limpa e os respingos foram retirados antes de serem pesadas de novo.

Figura 3.2: Esquema mostrando o passo a passo do experimento. (A - Chapas cortadas; B - Chapas limpas e lixadas; C - Chapas soldadas; D - Chapas limpas e pesadas).

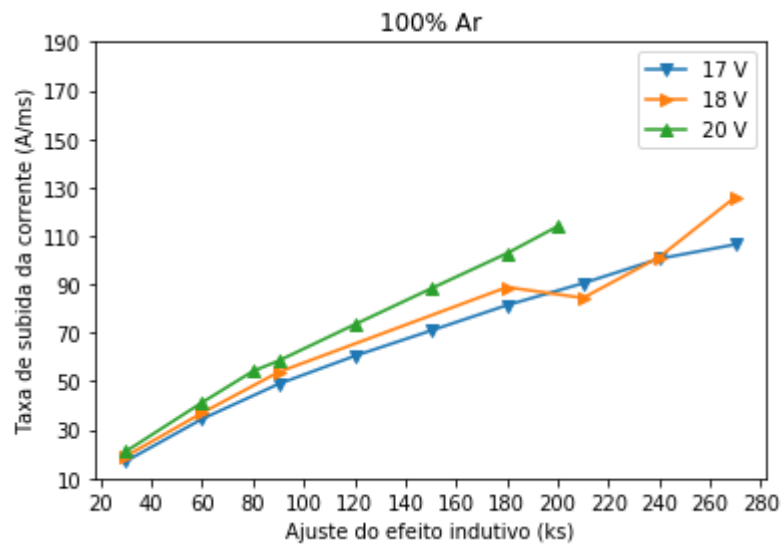


Fonte: Produzido pelos autores.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

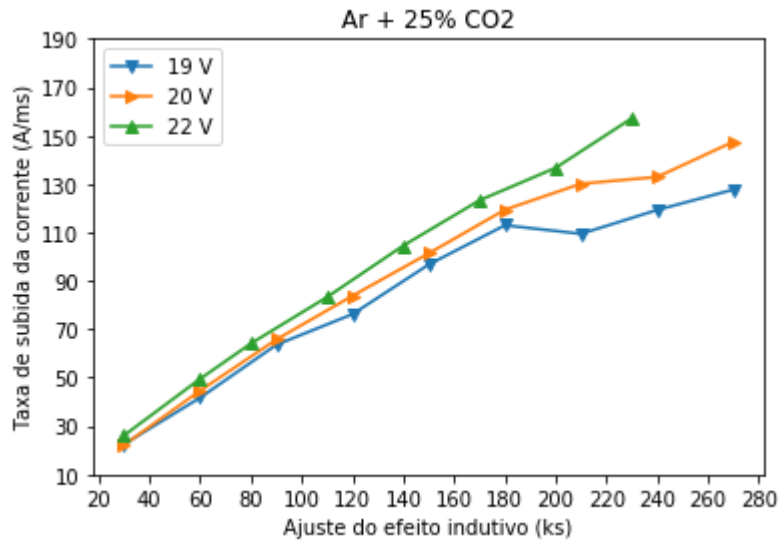
Os resultados foram compilados e utilizando Python, gráficos foram gerados para facilitar seu entendimento. Nos gráficos das Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 é possível notar que a taxa de subida da corrente foi influenciada pela presença de CO₂ na mistura gasosa. Resultados similares foram encontrados nos experimentos de Lohse et al (2020), mas divergente do encontrado por Souza et al (2011_B).

Figura 4.1: Taxa de subida da corrente em função do ajuste do efeito indutivo para 100% de Ar.



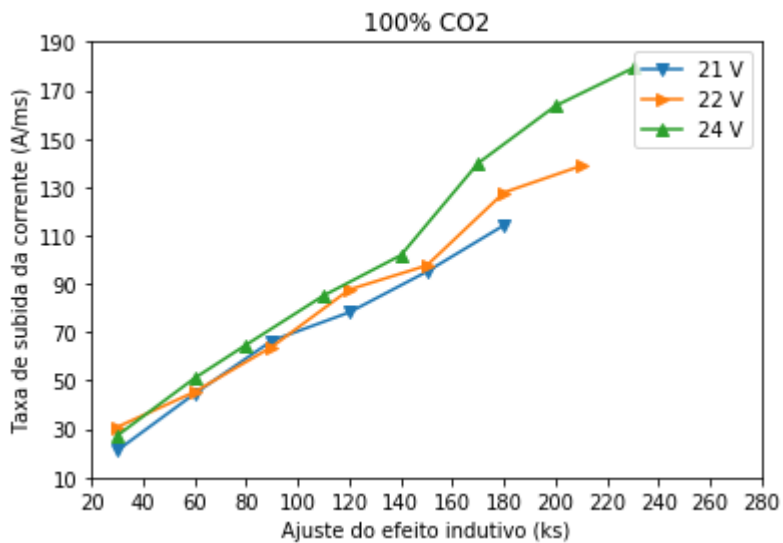
Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 4.2: Taxa de subida da corrente e ajuste do efeito indutivo para o Ar mais 25% de CO₂.



Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 4.3: Taxa de subida da corrente e ajuste do efeito indutivo para 100% de CO₂.

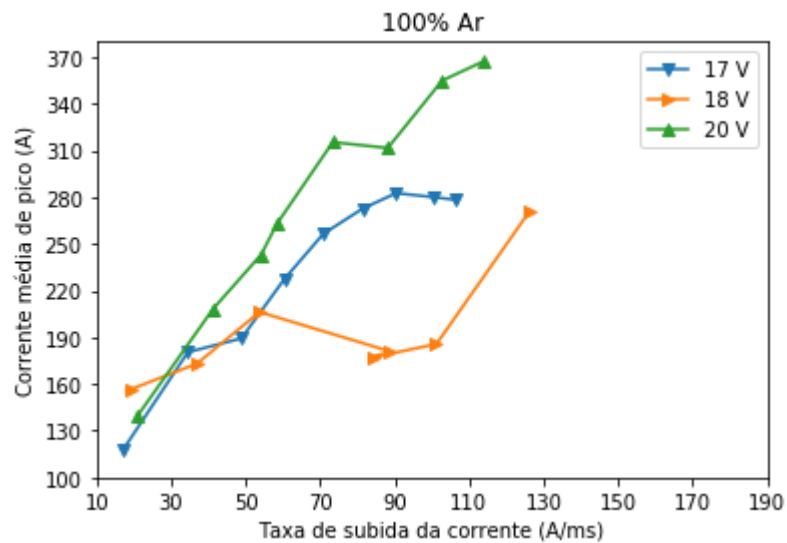


Fonte: Produzido pelos autores.

É possível perceber que a taxa de subida da corrente se comporta de forma diferente quando a soldagem é feita com argônio puro, e de forma similar entre Ar + CO₂ e CO₂. Para mesmos valores de ajuste do efeito indutivo na fonte tem-se valores menores de taxa de subida

da corrente em soldagens feitas com argônio puro. Uma primeira hipótese sobre este comportamento foi que a adição de CO₂ está associada com maiores correntes de pico. Para testar essa hipótese foram feitos os gráficos das Figuras 4.4, 4.5, e 4.6.

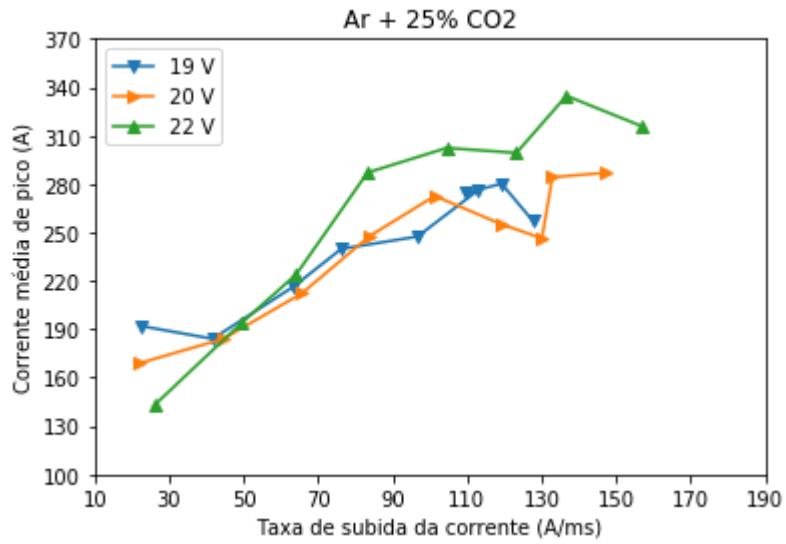
Figura 4.4: Relação entre a corrente média de pico e a taxa de subida da corrente para 100% de Ar.



Fonte: Produzido pelos autores.

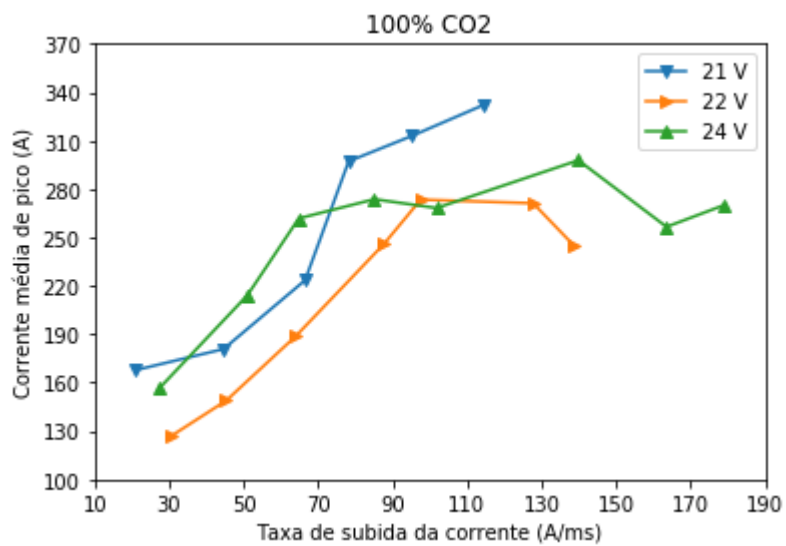
Nos gráficos das Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 é possível observar que nas soldagens feitas com CO₂ tiveram correntes de pico maiores do que nos experimentos feitos com argônio, confirmando a hipótese levantada anteriormente. Este comportamento talvez esteja relacionado às maiores taxas de subida das correntes para esses gases, mas estes mesmos valores tendem a um platô de valor máximo, diferentemente da taxa de subida da corrente. Uma possível hipótese para explicar isso é que para valores maiores de taxa de subida da corrente tem-se valores menores de tempo de curto-circuito. Para testar essa hipótese os gráficos das Figuras 4.7, 4.8 e 4.9, com os valores de tempo de curto circuito foram plotados.

Figura 4.5: Relação entre a corrente média de pico e a taxa de subida da corrente para Ar mais 25% de CO₂.



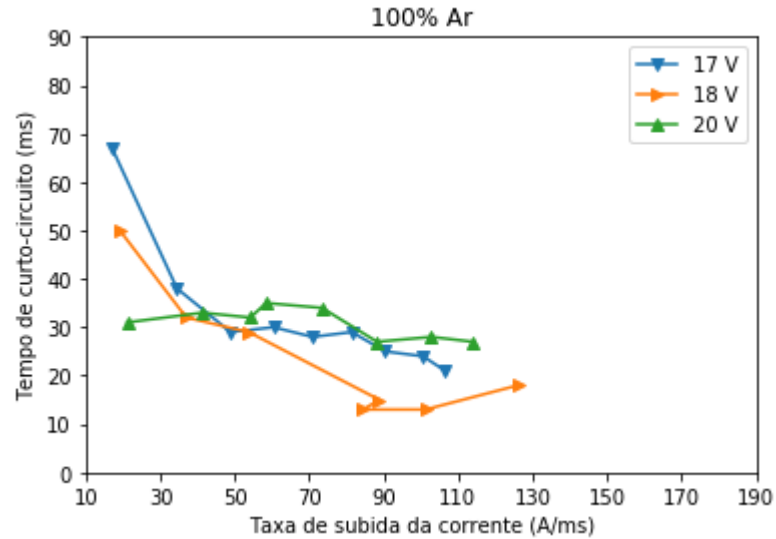
Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 4.6: Relação entre a corrente média de pico e a taxa de subida da corrente para 100% de CO₂.



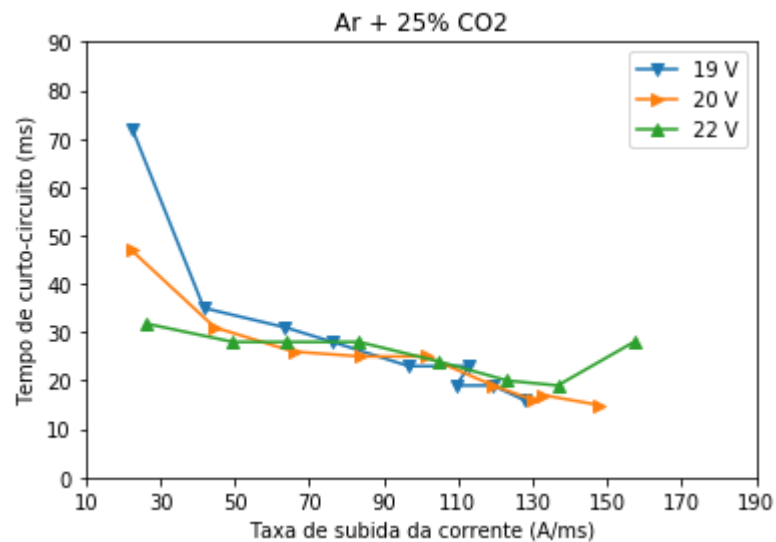
Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 4.7: Relação entre o tempo de curto-circuito e a taxa de subida da corrente para 100% de Ar.



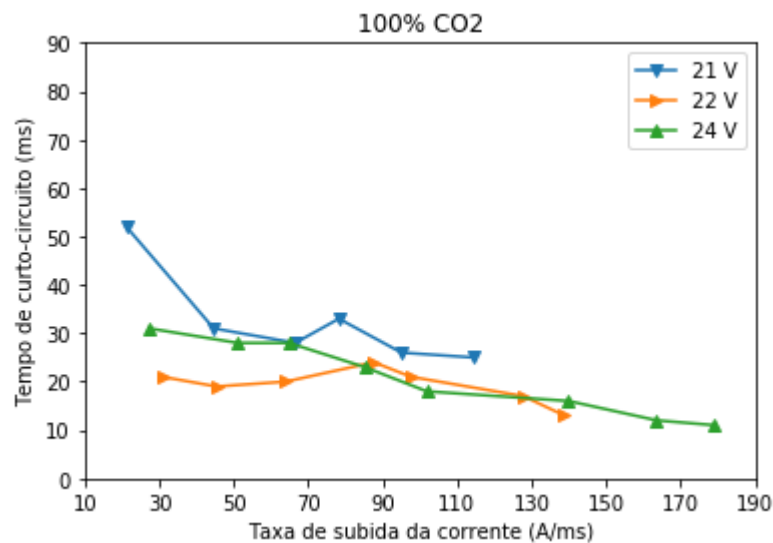
Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 4.8: Relação entre o tempo de curto-circuito e a taxa de subida da corrente para Ar mais 25% de CO₂.



Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 4.9: Relação entre o tempo de curto-circuito e a taxa de subida da corrente para 100% de CO₂.



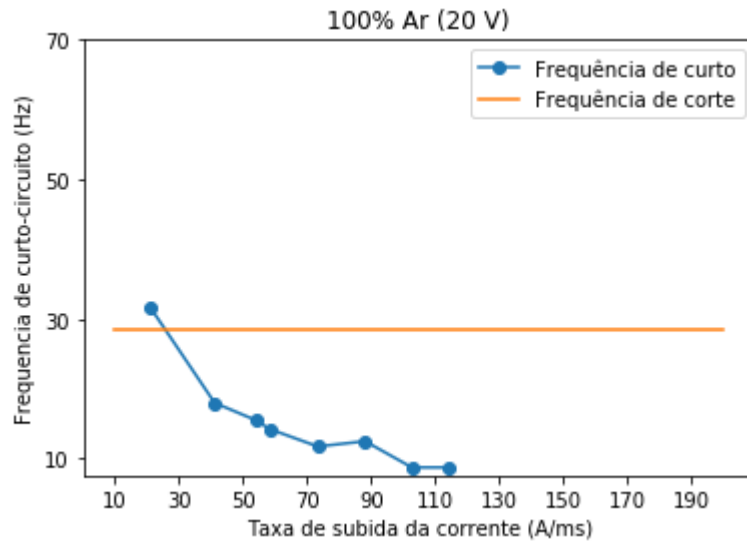
Fonte: Produzido pelos autores.

É possível ver nos gráficos das Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 que há uma diminuição dos tempos de curto-circuito com o aumento das taxas de subida das correntes durante a soldagem, como postulado anteriormente.

O teor de gás carbônico está influenciando na taxa de subida da corrente, como encontrado por Lohse et al (2020), mas o comportamento dos tempos de curto-circuito e correntes médias de pico não explicam as diferentes taxas de subida da corrente para as diferentes misturas gasosas.

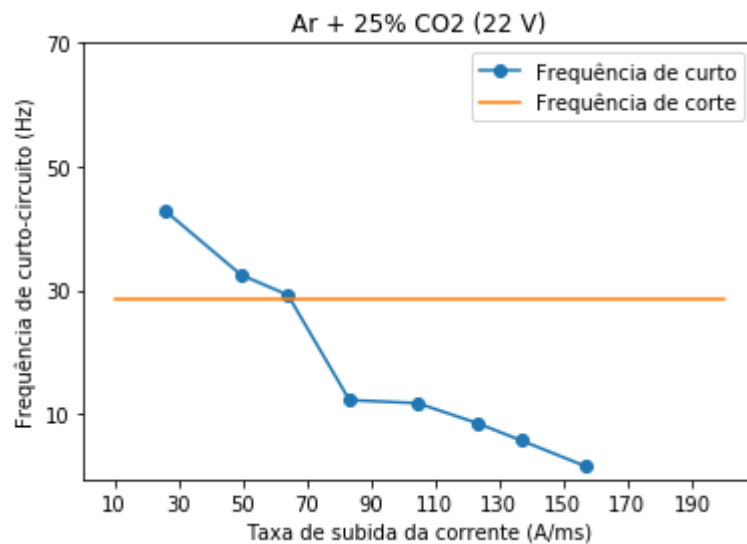
A análise feita pelo programa permite saber várias variáveis do processo de soldagem, principalmente a frequência de curto-circuito e índice de estabilidade. Os valores de frequências de corte de curto-circuito foram calculados utilizando um tamanho de gota de 30% do diâmetro do arame, como mostram as Figuras 4.10, 4.11 e 4.12, este valor foi o mesmo utilizado por Rezende (2011) em seus cálculos e proporcionou maior quantidade de transferência por curto-circuito nos nossos experimentos.

Figura 4.10: Relação entre a frequência e a taxa de subida da corrente para 100% de Ar com tensão de regulagem de 20 V.



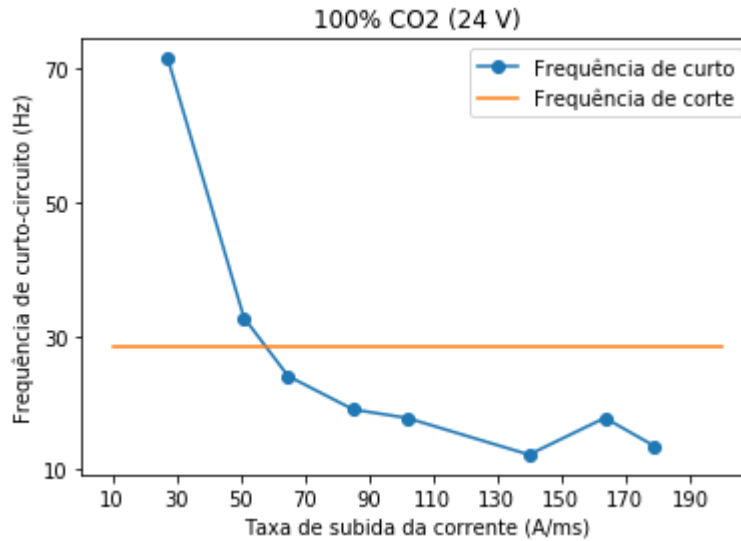
Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 4.11: Relação entre a frequência e a taxa de subida da corrente para Ar mais 25 % de CO₂ com tensão de regulagem de 22 V.



Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 4.12: Relação entre a frequência e a taxa de subida da corrente para 100 % CO₂ com tensão de regulagem de 24 V.

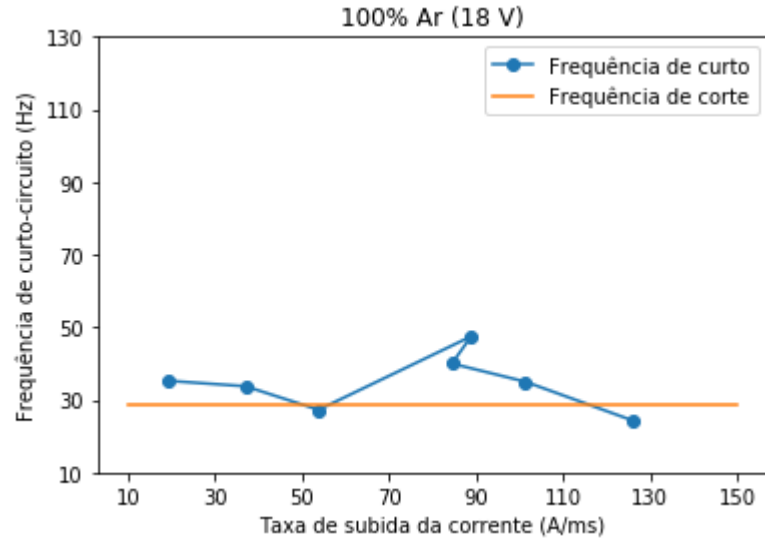


Fonte: Produzido pelos autores.

Os gráficos das Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 são respectivamente dos primeiros experimentos feitos com Ar, Ar e 25% de CO₂ e CO₂ puro. Os gráficos mostram que a maior parte dos experimentos resultaram numa transferência mista (frequência de curto-circuito abaixo da frequência de corte). Os mesmos experimentos foram feitos para as mesmas misturas gasosas, com tensões inferiores, para melhorar a qualidade da transferência.

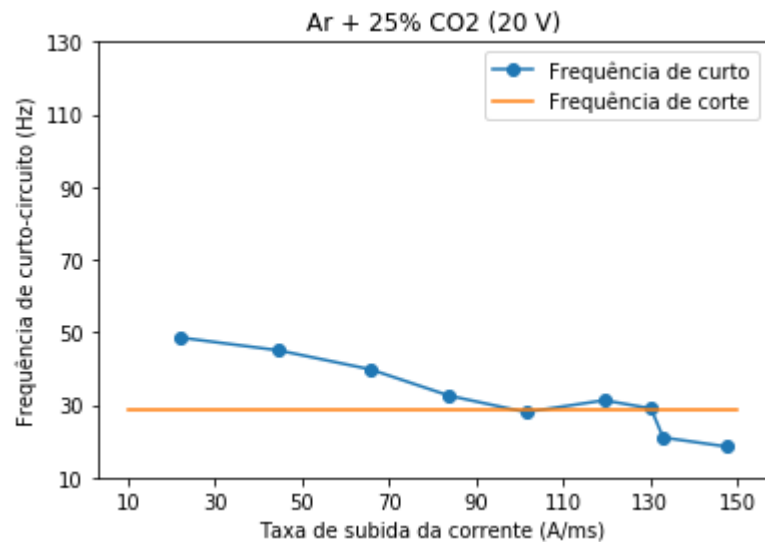
Os gráficos mostrados nas Figuras 4.13, 4.14 e 4.15, são respectivamente dos segundos experimentos feitos com Ar, Ar e 25% de CO₂ e CO₂ puro. Os gráficos mostram uma maior quantidade de transferência acontecendo no modo curto-circuito. Os experimentos foram repetidos com as mesmas misturas gasosas, com tensões inferiores, para uma nova análise.

Figura 4.13: Relação entre a frequência e a taxa de subida da corrente para 100% de Ar com tensão de regulação de 18 V.



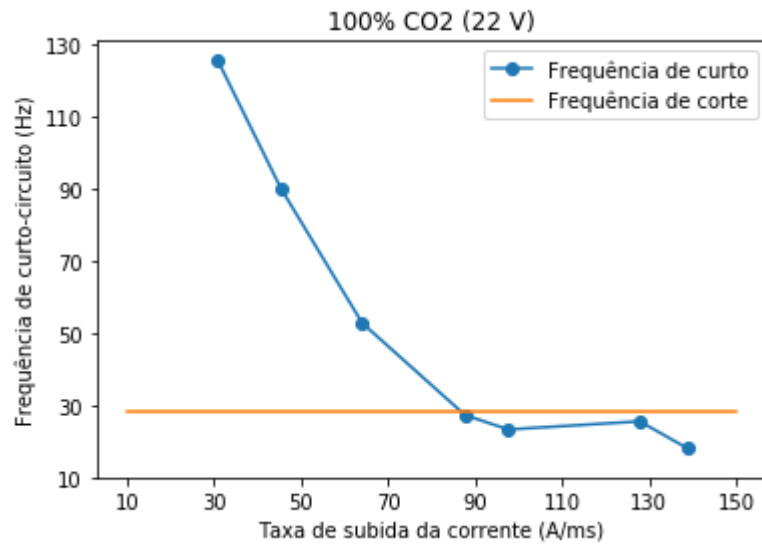
Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 4.14: Relação entre a frequência e a taxa de subida da corrente para Ar mais 25% de CO₂ com tensão de regulação de 20 V.



Fonte: Produzido pelos autores.

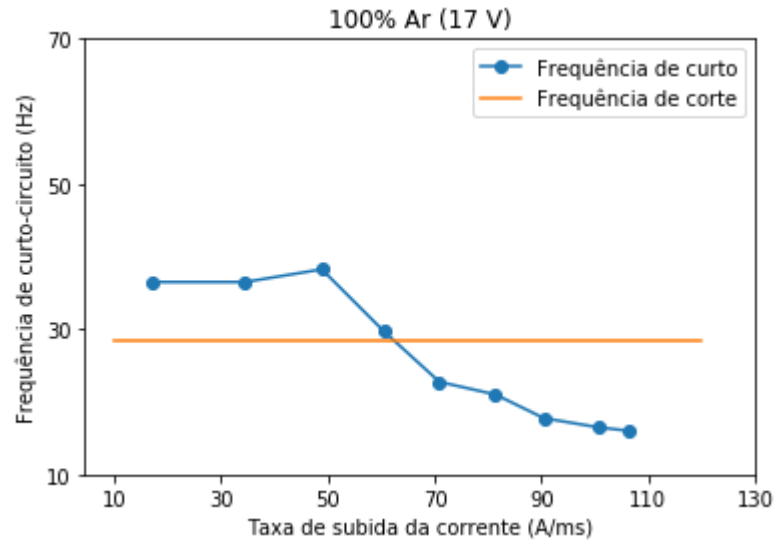
Figura 4.15: Relação entre a frequência e a taxa de subida da corrente para 100% CO₂ com tensão de regulação de 22 V.



Fonte: Produzido pelos autores.

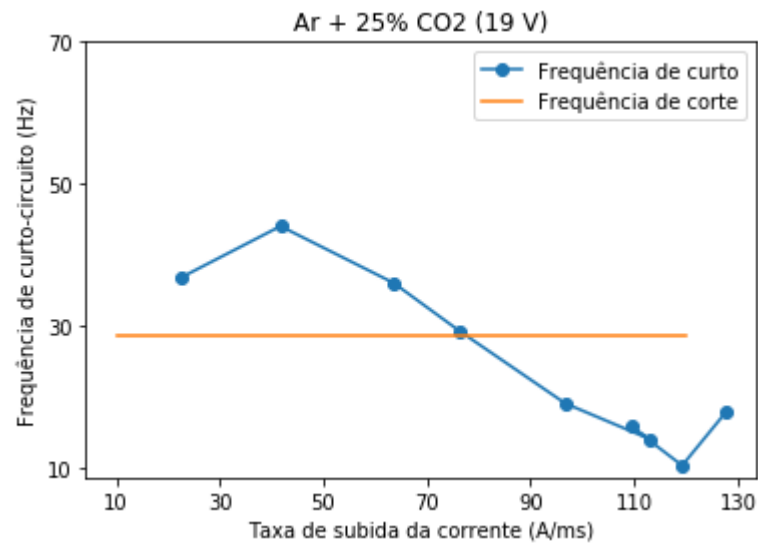
Para verificar o efeito da tensão na transferência os valores de tensão foram novamente diminuídos. Os experimentos mostrados nas Figuras 4.16, 4.17 e 4.18, são referentes aos gases Ar, Ar mais 25% de CO₂ e CO₂ respectivamente. Esses experimentos foram importantes para a determinação de um valor de taxa de subida da corrente (ajuste do k_s na fonte) onde houvesse transferência por curto-circuito e melhores valores para o índice de regularidade. Como observado nas Figuras 4.19, 4.20 e 4.21.

Figura 4.16: Relação entre a frequência e a taxa de subida da corrente para 100% de Ar com tensão de regulação de 17 V.



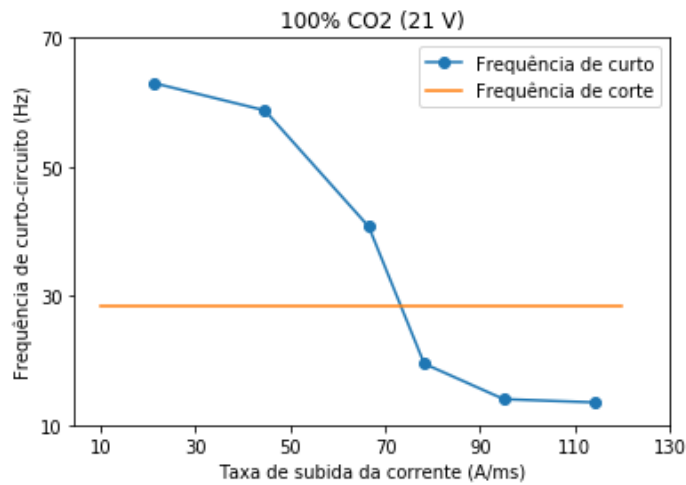
Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 4.17: Relação entre a frequência e a taxa de subida da corrente para Ar mais 25% de CO₂ com tensão de regulação de 19 V.



Fonte: Produzido pelos autores.

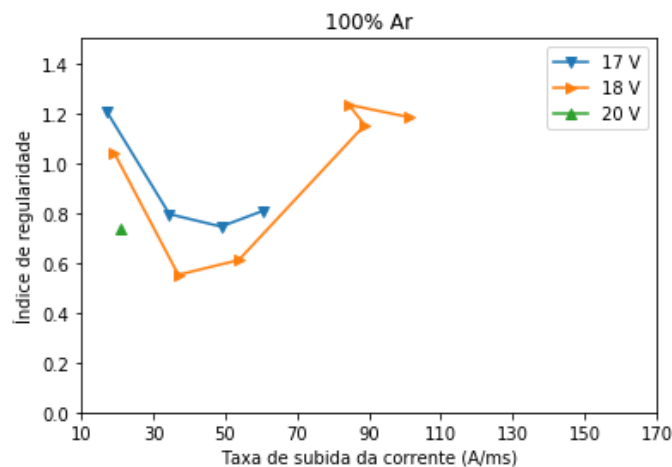
Figura 4.18: Relação entre a frequência e a taxa de subida da corrente para 100% de CO₂ com tensão de regulagem de 21 V.



Fonte: Produzido pelos autores.

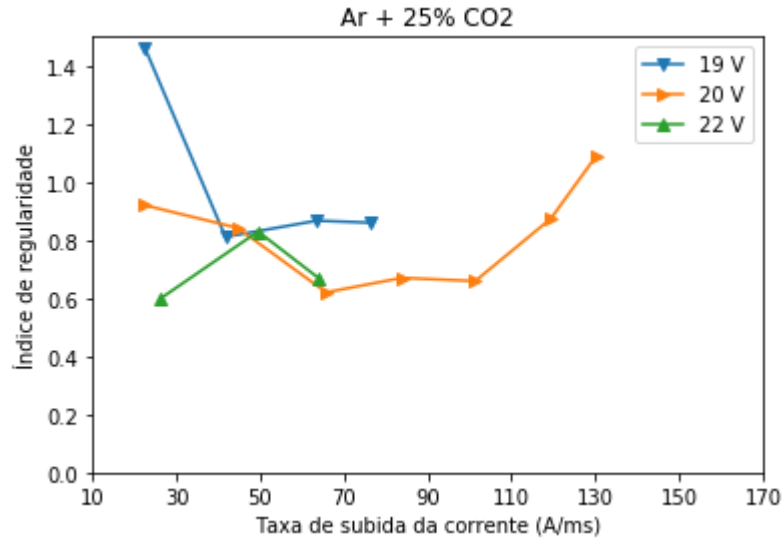
Seguindo os gráficos das Figuras 4.19, 4.20 e 4.21, respectivamente para o gás Ar, Ar e CO₂ e CO₂, pode-se observar uma faixa de valores da taxa de subida da corrente onde os valores de regularidade são melhores.

Figura 4.19: Relação entre a regularidade e a taxa de subida da corrente para 100% de Ar.



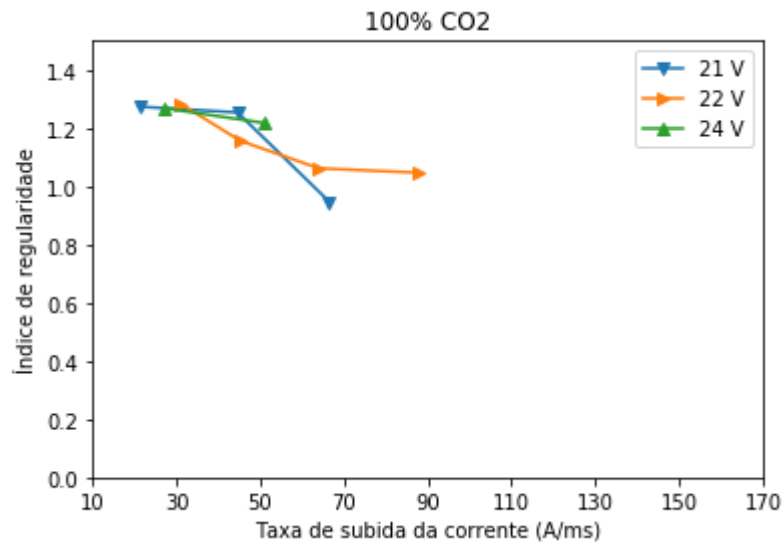
Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 4.20: Relação entre a regularidade e a taxa de subida da corrente para Ar e 25% de CO₂.



Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 4.21: Relação entre a regularidade e a taxa de subida da corrente para 100% de CO₂.



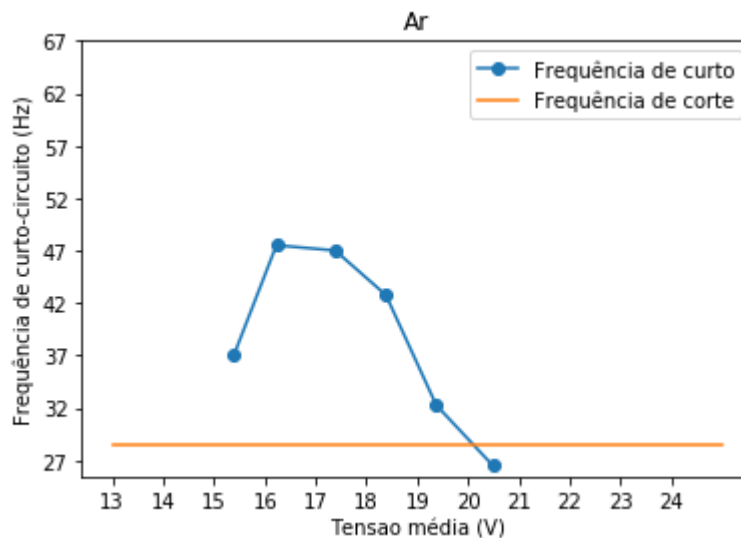
Fonte: Produzido pelos autores.

Para o 100% Ar considerou-se a faixa valores de taxa de subida da corrente de 30 e 70 A/ms como valores de melhor regularidade; para Ar+25%CO₂ considerou-se a faixa valores de

taxa de subida da corrente entre 50 e 110 A/ms ; para 100% CO₂ entre 50 e 90 A/ms, os valores escolhidos para realizar os experimentos variando a tensão de regulagem foram 50 A/ms para Ar, 80 A/ms Ar + 25% de CO₂ e 70 A/ms para CO₂ puro.

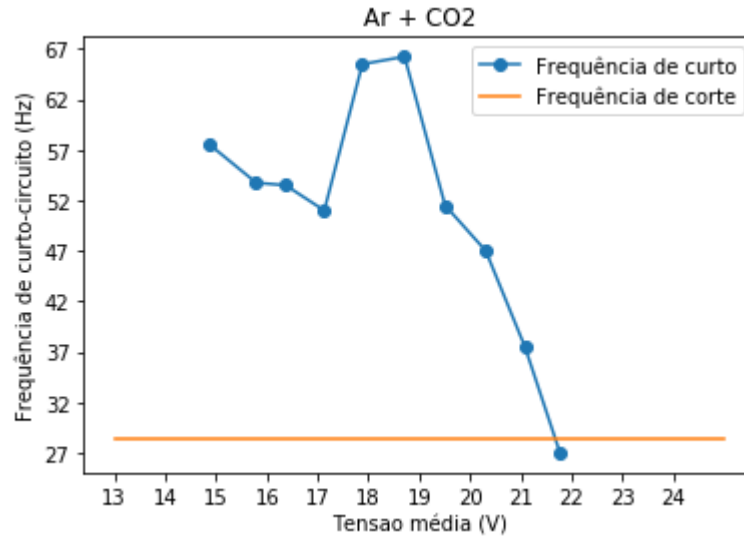
As Figuras 4.22, 4.23 e 4.24, mostram os gráficos de frequência curto-circuito em função da tensão média de soldagem e os valores de frequência de corte para esses experimentos. A tensão média utilizada nestes experimentos foram as mostradas na Tabela 3.2, os valores de efeito indutivo utilizados foram ks 90 para Ar, ks 120 Ar + 25% de CO₂ e ks 100 para CO₂ puro. Os valores de efeito indutivo foram estimados utilizando os gráficos das Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 que correlacionam os valores de ajuste do efeito indutivo com a taxa de subida da corrente.

Figura 4.22: Relação entre a frequência e tensão média de operação para 100% de Ar e ks = 90.



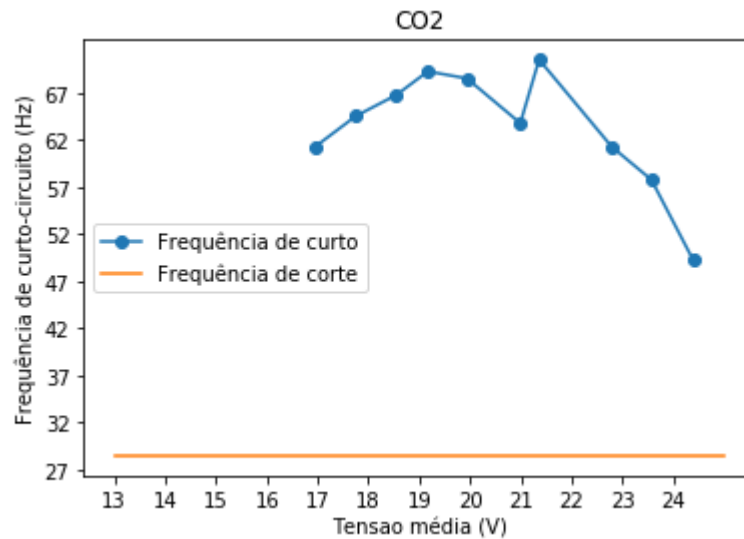
Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 4.23: Relação entre a frequência e tensão média de operação para Ar mais 25% de CO₂ e $k_s = 120$.



Fonte: Produzido pelos autores.

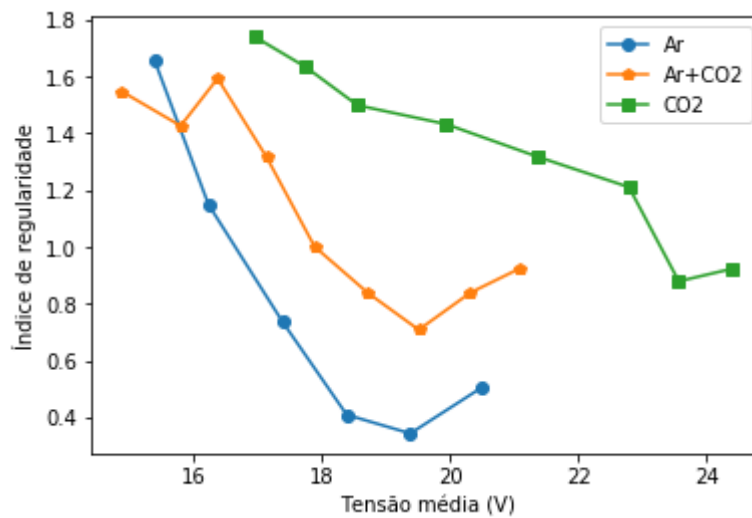
Figura 4.24: Relação entre a frequência e tensão média de operação para 100% de CO₂ e $k_s = 100$.



Fonte: Produzido pelos autores.

A Figura 4.25 mostra os gráficos de regularidade com a tensão média de soldagem, com isso é possível precisar uma faixa de valores ótimos para a tensão de soldagem para cada gás. Há uma tendência do aumento dos valores de tensão de soldagem diminuir a regularidade do processo independente do gás de proteção e o aumento da quantidade de CO₂ diminuir a regularidade do processo, em conformidade com os resultados mostrados por Liskevych e Scotti, (2015).

Figura 4.25: Gráfico da regularidade pela tensão média de soldagem para 100% de Ar, para Ar mais 25% de CO₂ e para 100% CO₂.



Fonte: Produzido pelos autores.

As faixas de valores para as tensões de soldagem com melhores regularidades foram, de 20 V a 17 V para Ar puro, de 21 V a 19 V para Ar + 25% de CO₂ e de 24 V a 22 V para CO₂, resultados de acordo com os encontrados por Silva (2020, p.74).

Tais resultados apontam para uma possível relação entre o tamanho do arco e a regularidade, pois uma maior quantidade de CO₂ está relacionada a diminuição do comprimento de arco de soldagem, como mostrado por Lohse et al (2020).

Em seguida foram realizados ensaios para levantamento da correlação entre a regularidade da transferência e o rendimento de deposição. Na Tabela 4.1 é possível ver os valores das

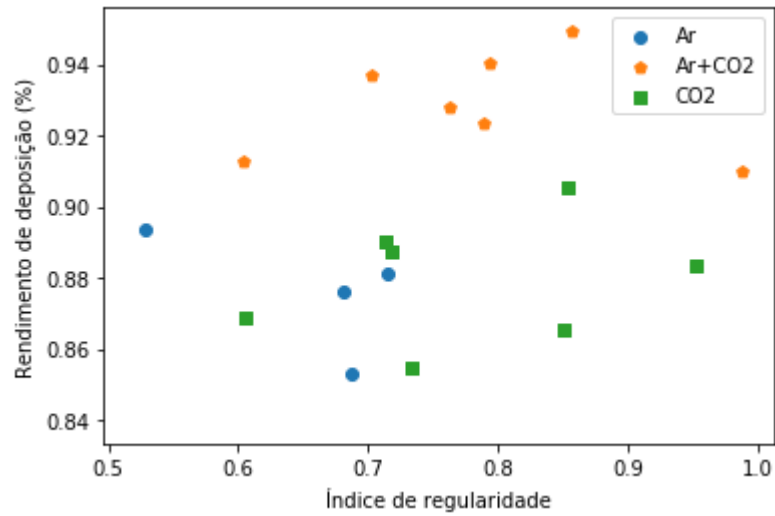
massas nas chapas antes e depois da soldagem, as soldagens foram feitas com valores de taxa de subida da corrente acima e abaixo dos valores com melhor regularidade, somando e diminuindo cinco, dez e quinze nos valores de ajuste do efeito indutivo da fonte, obteve-se sete valores para cada gás, estes valores foram ks 60, 75, 85, 90, 95, 105 e 120 para Ar, ks 90, 105, 115, 120, 125, 135 e 150 para Ar + 25% de CO₂ e ks 70, 85, 95, 100, 105, 115 e 130 para CO₂ puro.

Tabela 4.1 - Valores de massa medidos antes e depois da soldagem.

Ar		Ar + 25% CO₂		100% CO₂	
Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa inicial (g)	Massa final (g)
139,27	145,64	143,67	149,36	143,11	150,22
141,17	147,42	144,26	149,89	143	150,63
135,11	141,53	143,39	149	141,74	150,16
144,39	150,87	143,08	148,64	136,99	144,28
141,26	147,6	143,43	148,99	142,52	150,91
147,99	154,3	142,87	148,49	143,19	150,34
145,28	151,63	143,12	148,71	143,21	150,56

Fonte: Produzido pelos autores.

Figura 4.26: Gráfico da regularidade pelo rendimento de deposição (%) para 100% de Ar, para Ar + 25% de CO₂ e para 100% CO₂.



Fonte: Produzido pelos autores.

Na Figura 4.26 é possível ver os resultados deste experimento. Os resultados mostram maior regularidade nas soldagens feitas com 100% Ar, corroborando os resultados anteriormente obtidos.

Em relação ao rendimento de deposição, o gráfico mostra uma tendência contrária ao esperado pois melhores regularidades tiveram piores rendimentos de deposição, ou seja, maior geração de respingos.

5. CONCLUSÕES

Para os parâmetros, condições de soldagem e materiais utilizados neste estudo, pode-se concluir que:

- O comportamento da relação entre o ajuste do efeito indutivo e a taxa de subida da corrente foi diferente para misturas gasosas com a adição de CO₂ no gás de proteção;
- O aumento da taxa de subida da corrente e a mistura gasosa utilizada afetaram a regularidade da transferência metálica;
- A faixa de valores para a taxa de subida da corrente onde os valores de regularidade foram melhores são: de 30 a 70 A/ms para Ar puro, de 50 a 110 A/ms para Ar + 25% de CO₂ e de 50 a 90 A/ms para CO₂;
- A faixa de valores para a tensão de soldagem para qual os valores de regularidade foram melhores são: de 20 V a 17 V para Ar puro, de 21 V a 19 V para Ar + 25% de CO₂ e de 24 V a 22 V para CO₂;
- As soldagens feitas com 100% Ar tiveram melhores valores de regularidade se comparadas com as outras misturas de gases;
- O rendimento de deposição teve uma tendência contrária ao da regularidade, quanto melhor a regularidade pior foi o rendimento de deposição;
- O melhor rendimento foi encontrado com Ar + 25% de CO₂, seguido pelo 100% CO₂ e o pior rendimento de deposição foi encontrado nas soldagens feitas com 100% Ar;

6. TRABALHOS FUTUROS

- Maior variação da porcentagem de CO₂ no gás para melhor avaliar o seu efeito na soldagem;
- Avaliar melhor a relação entre regularidade e geração de respingos fixando a taxa de

subida da corrente e variando a tensão de soldagem;

- Realizar análise dos dados utilizando testes estatísticos e séries temporais;
- Fazer experimentos para tentar relacionar o tamanho do comprimento de arco com a regularidade da transferência;
- Fazer experimentos de medição de respingos utilizando outra metodologia mais precisa, que meça a massa perdida nos respingos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Apostila Soldagem MIG/MAG - ESAB. 2005. Disponível em:<<https://www2.ufjf.br/profab/files/2016/09/ESAB-Apostila-MIG-MAG.pdf>>. Acesso em: 29 set 2020.

BOHRER, C. B. Influência do Gás de Proteção Sobre o Aporte Térmico na Soldagem MIG/MAG de Aços ao Carbono. 2013. 22 Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

BULLE, Jose Vinicius. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA. p. 46, 2017.

CAMARGO, Lucas Gomes; DRECHSLER, Maikol Funk; SANTOS, Cleverson Maxwell; et al. Proposta e Análise de Dispositivo para Otimização do Destacamento da Gota na Soldagem MIG/MAG. Soldagem & Inspeção, v. 21, n. 1, p. 83–91, 2016.

CORREIA, Davi Sampaio; GONÇALVES, Cristiene Vasconcelos; DA CUNHA, Sebastião Simões; et al. Comparison between genetic algorithms and response surface methodology in GMAW welding optimization. Journal of Materials Processing Technology, v. 160, n. 1, p. 70–76, 2005.

COSTA, Thonson Ferreira; BENEDETTI FILHO, Edmundo; AREVALO, Hernán Dario Hernández; et al. Avaliação de processos MIG/MAG curto-circuito convencional e controlado para a soldagem de dutos de aço carbono em passe único. Soldagem & Inspeção, v. 17, n. 4, p. 356–

368, 2012.

DUARTE, Vinicius Da Silva. DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DO SINAL DE SOLDA EM SOLDAGENS MIG/MAG POR CURTO-CIRCUITO. p. 43, 2017.

DUTRA, Jair Carlos. MIG/MAG - Transferência Metálica por Curto-Circuito – Fontes de Soldagem versus Gases do Arco. v. 13, n. 1, p. 6, 2008.

FERNANDES, Diandro Bailoni; MENEZES JÚNIOR, Luiz Carlos de; VILARINHO, Louriel Oliveira; et al. Ensaio para medição de nível e alcance de respingos em soldagem MIG/MAG. Soldagem & Inspeção, v. 15, n. 2, p. 150–155, 2010.

GARCIA, Regina Paula; SCOTTI, Américo. Uma metodologia para análises comparativas da capacidade produtiva entre arames maciços (MIG/MAG) e tubulares (eletrodo tubular). Soldagem & Inspeção, v. 16, n. 2, p. 146–155, 2011.

GOMES, J.H.F.; COSTA S.C.; PAIVA, A.P.; BALESTRASSI, P.P. Mathematical Modeling of Weld Bead Geometry, Quality, and Productivity for Stainless Steel Claddings Deposited by FCAW. Journal of Materials Engineering and Performance, v.21, n.9, p.1862-1872, 2012

GUAN, Zi Qi; ZHANG, Hong Xu; LIU, Xiao Guang; et al. Effect of magnetic field frequency on the shape of GMAW welding arc and weld microstructure properties. Materials Research Express, v. 6, n. 8, p. 0865e5, 2019.

HIRATA, Edson Kazuo; BELTZAC, Luiz Felipe; OKIMOTO, Paulo César; et al. Influência da corrente sobre o rendimento bruto de fusão em soldagem MIG/MAG. Soldagem & Inspeção, v. 19, n. 2, p. 159–167, 2014.

JORGE, Vinicius Lemes; SCOTTI, Fernando Matos; REIS, Ruham Pablo; et al. Wire feed pulsation as a means of inducing surface tension metal transfer in Gas Metal Arc Welding. Journal of Manufacturing Processes, v. 62, p. 655–669, 2021.

LISKEVYCH, Olga; SCOTTI, Américo. Influence of the CO₂ content on operational performance of short-circuit GMAW. *Welding in the World*, v. 59, n. 2, p. 217–224, 2015.

LOHSE, Martin; TRAUTMANN, Marcus; FÜSSEL, Uwe; et al. Influence of the CO₂ Content in Shielding Gas on the Temperature of the Shielding Gas Nozzle during GMAW Welding. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, v. 4, n. 4, p. 113, 2020.

MARQUES, C. Análise de técnicas e efeitos físicos da alimentação dinâmica do arame no processo de soldagem MIG/MAG com vistas ao desenvolvimento de um sistema flexível nacional. 2017. 210f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina.

MELLO, H. F. Análise da influência dos gases de proteção no processo de soldagem MIG/MAG sobre as distorções de chapas de aço. 2015. 51f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina.

MODENESI, Paulo J. Fontes de Energia para a Soldagem a Arco. p. 37, 2008.

PESSOA, Ezequiel Caires Pereira; DE, Abril. ESTUDO DA VARIAÇÃO DA POROSIDADE AO LONGO DO CORDÃO EM SOLDAS SUBAQUÁTICAS MOLHADAS. p. 157, 2007.

PETRACHI, L. M. Avaliação da influência da distância entre o bico de contato e a peça na taxa de fusão no processo de soldagem MIG/MAG. 2021. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia.

QUINTINO, Luisa; LISKEVICH, Olga; VILARINHO, Louriel; et al. Heat input in full penetration welds in gas metal arc welding (GMAW). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 68, n. 9–12, p. 2833–2840, 2013.

REZENDE, Gabriel Maradei Carneiro de; LISKÉVYCH, Olga; VILARINHO, Louriel Oliveira; et al. Um critério para determinar a regulagem da tensão em soldagem MIG/MAG por curto-circuito. *Soldagem & Inspeção*, v. 16, n. 2, p. 98–103, 2011.

SCHAFRANSKI, L. L. Efeitos do hidrogênio e do dióxido de carbono em misturas à base de

argônio e da bitola de arame quanto aos aspectos de produtividade e qualidade de soldas realizadas pelo processo MIG/MAG. 2016. p. 125. Tese de Mestrado, a Universidade Federal de Santa Catarina.

SCOTTI A, PONOMAREV V, editores. Soldagem MIG/MAG – melhor entendimento, melhor desempenho. 2ª. Edição. Artliber Editora; 2008.

SILVA, João Guilherme Ferreira. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO GÁS DE PROTEÇÃO DA SOLDAGEM MIG/MAG NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE UMA JUNTA. p. 74, 2020.

SOUZA, Claudio Ivanei de; FERRARESI, Valtair Antonio. Análise comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW com transferência metálica por curto-circuito na posição horizontal. Soldagem & Inspeção, v. 18, n. 3, p. 268–280, 2013.

SOUZA, D. et al., Relatório Interno Laprosolda/UFU 13/2009 - Manual de Utilização do Programa de Análise de Curto-Circuito para Determinação da Estabilidade de Transferência no Processo de Soldagem MIG/MAG, 9p

SOUZA, Daniel. Levantamento de mapas operacionais de transferência metálica para soldagem MIG/MAG de aço ao carbono na posição plana. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. Minas Gerais, p. 304. 2010.

SOUZA, Daniel; ROSSI, Marcelo Lemos; KEOCHEGUERIAN, Flávio; et al. Influência da regulagem de parâmetros de soldagem sobre a estabilidade do processo MIG/MAG operando em curto-circuito. Soldagem & Inspeção, v. 16, n. 1, p. 22–32, 2011_A.

SOUZA, Daniel; ROSSI, Marcelo Lemos; KEOCHEGUERIAN, Flávio; et al. Influência da tensão de soldagem e do gás de proteção sobre a correlação entre indutância e regularidade da transferência metálica na soldagem MIG/MAG por curto-circuito. Soldagem & Inspeção, v. 16, n. 2, p. 114–123, 2011_B.

TATAGIBA, Luiz Claudio Soares; GONÇALVES, Renata Barbosa; PARANHOS, Ronaldo.

Tendências no desenvolvimento de gases de proteção utilizados na soldagem MIG/MAG. *Soldagem & Inspeção*, v. 17, n. 3, p. 218–228, 2012.

ULLER, J. C. A influência da indutância na geometria do cordão de solda no processo MIG/MAG. 2013. 82f. Trabalho de conclusão de curso, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.