

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

GABRIEL MENDES CORDEIRO

**UM ALGORITMO PARA CÁLCULO DA FREQUÊNCIA DE CURTO-CIRCUITO  
COM E SEM CURTOS INCIPIENTES**

JUIZ DE FORA

2017

GABRIEL MENDES CORDEIRO

**UM ALGORITMO PARA CÁLCULO DA FREQUÊNCIA DE CURTO-CIRCUITO  
COM E SEM CURTOS INCIPIENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr., Moisés Luiz Lagares Júnior

JUIZ DE FORA

2017

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Cordeiro, Gabriel Mendes.

UM ALGORITMO PARA CÁLCULO DA FREQUÊNCIA DE CURTO-CIRCUITO COM E SEM CURTOS INCIPIENTES / Gabriel Mendes Cordeiro. -- 2017.

51 f.

Orientador: Moisés Luiz Lagares Júnior

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2017.

1. Soldagem. 2. MIG/MAG. 3. Curto-circuito. I. Lagares Júnior, Moisés Luiz, orient. II. Título.

GABRIEL MENDES CORDEIRO

**UM ALGORITMO PARA CÁLCULO DA FREQUÊNCIA DE CURTO-CIRCUITO  
COM E SEM CURTOS INCIPIENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em 21 de junho de 2017.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr., Moisés Luiz Lagares Júnior (Orientador)

Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Prof. Dr., Raphael Fortes Marcomini

Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Eng. Marcus Vinicius Garcia de Carvalho

Universidade Federal de Juiz de Fora

## **DEDICATÓRIA**

Dedico à minha mãe pelos valores ensinados durante essa caminhada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao orientador Prof. Dr. Moisés Luiz Lagares Júnior por todo o apoio necessário ao desenvolvimento deste trabalho, inclusive por ter me sugerido o tema estudado. Aos membros da banca por me avaliarem numa etapa tão importante da minha vida.

## RESUMO

O Índice Vilarinho de Regularidade da transferência por curto-circuito –  $IV_{cc}$  e a faixa admissível de tamanho de gota em transferência por curto-circuito –  $\Delta F_{cc}$  são os parâmetros adotados pelo critério desenvolvido pelo grupo Laprosolda para avaliar a estabilidade do processo de soldagem MIG/MAG convencional. Visando um futuro monitor em tempo real da qualidade do cordão de solda, a elaboração e validação de um algoritmo para cálculo da frequência de curto-circuito e três perspectivas complementares do Índice Vilarinho de Regularidade:  $IV_{cc}$  Dinâmico,  $IV_{cc}$  Acumulativo e  $IV_{cc}$  Médio são propostos neste estudo. Para realização dos ensaios, soldagens de simples deposição sobre chapas de aço 1020 foram feitas variando a composição da atmosfera protetora e o fluxo de gás de proteção com a finalidade de quantificar a regularidade da transferência metálica. Os resultados indicam que o teor de  $CO_2$  na atmosfera protetora, a vazão de gás regulada e a ocorrência de curtos-circuitos incipientes influenciam a estabilidade do processo.

Palavras-chave: Soldagem, MIG/MAG, curto-circuito.

## ABSTRACT

The Vilarinho Index of Regularity of short-circuit transfer -  $IV_{cc}$  and the admissible drop-size band in short-circuit transfer -  $\Delta F_{cc}$  are the adopted parameters by the criteria developed by the Laprosolda group to evaluate the stability of the conventional MIG / MAG welding process. The elaboration and validation of an algorithm to calculate the short-circuit frequency and three complementary perspectives of the Vilarinho Index of Regularity: Dynamic  $IV_{cc}$ , Accumulative  $Iv_{cc}$  and Medium  $IV_{cc}$  are proposed in this study aiming at a future real-time monitor of the quality of the weld bead. To perform the tests, welds of simple deposition on 1020 steel plates were made by varying the composition of the protective atmosphere and the flow of protection gas in order to quantify the regularity of the metal transfer. The results indicate that the  $CO_2$  content in the protective atmosphere, the regulated gas flow, and the occurrence of incipient short circuits influence the stability of the process.

Keywords: Welding, MIG/MAG, short circuit.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Gases e misturas usados na soldagem MIG/MAG .....	14
Figura 2: Diferenças em penetração, em função de diferentes gases e misturas .....	14
Figura 3: Comportamento da tensão e corrente na transferência por curto-circuito .....	16
Figura 4: Faixas de transição dos limites superiores e inferiores da tensão de soldagem em que os $I_{Vcc}$ são aceitáveis, em função das faixas de frequência máxima e mínima adequadas para haver a transferência com estabilidade .....	20
Figura 5: Comparação do índice de regularidade com os coeficientes de variação do tempo de curto-circuito e do tempo de arco aberto em função da tensão de soldagem .....	21
Figura 6: Algoritmo Frequência Média de Curto-Circuito (parte 1) .....	22
Figura 7: Algoritmo Frequência Média de Curto-Circuito retirando-se os curtos incipientes (parte 2) .....	23
Figura 8: Fluxograma do algoritmo Frequência Média de Curto-Circuito (parte 1) .....	24
Figura 9: Fluxograma do algoritmo Frequência Média de Curto-Circuito retirando-se curtos incipientes (parte 2) .....	25
Figura 10: Cordões de solda .....	27
Figura 11: Cálculo de frequência considerando passagens consecutivas por zero .....	29
Figura 12: Sinais de tensão x tempo .....	30
Figura 13: Frequência de curto-circuito pelo método zero .....	30
Figura 14: Cálculo de frequência considerando uma função periódica .....	31
Figura 15: $\Delta F_{cc}$ x Fluxo de Gás .....	33
Figura 16: $I_{Vcc}$ Dinâmico para Argônio Puro .....	35
Figura 17: $I_{Vcc}$ Dinâmico para 80% Argônio - 20% CO <sub>2</sub> .....	36
Figura 18: $I_{Vcc}$ Acumulativo para Argônio .....	39
Figura 19: $I_{Vcc}$ Acumulativo para 80% Argônio - 20% .....	40
Figura 20: $I_{Vcc}$ Médio x Fluxo de Gás .....	42
Figura 21: $I_{Vcc}$ Dinâmico para Argônio Puro com e sem curtos incipientes .....	44
Figura 22: $I_{Vcc}$ Dinâmico para 80% Argônio - 20% CO <sub>2</sub> com e sem curtos incipientes .....	45
Figura 23: $I_{Vcc}$ Dinâmico para CO <sub>2</sub> puro com e sem curtos incipientes .....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Influência do tipo de gás de proteção para três diferentes tipos de arame eletrodo na Fcc.....	19
Tabela 2 – Resultados gerais para os rendimentos, frequências de curtos-circuitos e IVcc ....	20
Tabela 3 – Ordem do processo de soldagem .....	28
Tabela 4 – Frequências de curto-circuito .....	31
Tabela 5 – Frequências de curto-circuito com e sem curtos incipientes para Ar puro.....	32
Tabela 6 – Frequências de curto-circuito com e sem curtos incipientes para 80% Ar - 20% CO2.....	32
Tabela 7 – IVcc Médio .....	42

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Ar	Gás Argônio
CO <sub>2</sub>	Gás Dióxido de Carbono
d	Diâmetro do arame-eletrodo em milímetros
DBCP	Distância Bico de Contato Peça
Fcc	Faixa admissível de tamanho de gota em transferência por curto-circuito
GMAW	Gas Metal Arc Welding
He	Gás Hélio
IVcc	Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência por Curto-circuito
k	Fator de multiplicação para estimar o diâmetro da gota
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
N <sub>2</sub>	Gás Nitrogênio
O <sub>2</sub>	Gás Oxigênio
tcc	Média do tempo de curto-circuito
tab	Média do tempo de arco aberto
Va	Velocidade de alimentação de arame em milímetros por segundo
$\sigma_{tcc}$	Desvio padrão da média do tempo de curto-circuito
$\sigma_{tab}$	Desvio padrão da média do tempo de arco aberto

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	11
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	12
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>13</b>
2.1 SOLDAGEM GMAW.....	13
2.2 TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-CIRCUITO.....	15
2.3 CRITÉRIO LAPROSOLDA.....	17
2.4 ESTADO DA ARTE.....	18
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
3.1 DEFINIÇÃO DO ALGORITMO.....	22
3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	26
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>29</b>
4.1 VALIDAÇÃO DO ALGORITMO.....	29
4.2 FREQUÊNCIA DE CURTO-CIRCUITO.....	31
4.3 ÍNDICE VILARINHO DE REGULARIDADE.....	34
<b>4.3.1 IV<sub>cc</sub> DINÂMICO.....</b>	<b>34</b>
<b>4.3.2 IV<sub>cc</sub> ACUMULATIVO....</b>	<b>37</b>
<b>4.3.3 IV<sub>cc</sub> MÉDIO.....</b>	<b>41</b>
4.4 CURTOS-CIRCUITOS INCIPIENTES.....	43
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>48</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>49</b>
<b>ANEXO 1 – TERMO DE AUTENTICIDADE.....</b>	<b>51</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Atualmente, o processo de soldagem a arco elétrico com proteção gasosa GMAW tem sido considerado um dos processos de fabricação mais utilizados no cenário industrial. A vasta gama de aplicações da soldagem GMAW são ditadas por suas vantagens - a alta produtividade, a possibilidade de variação de modos da transferência metálica e a facilidade de soldar em diversas posições garantem versatilidade operacional ao processo. Em virtude da sua relevância na fabricação, assegurar a estabilidade do processo de soldagem é indispensável em busca de uma boa qualidade do cordão de solda.

De uma forma geral, a estabilidade na soldagem GMAW pode ser avaliada por três fatores: estabilidade do arco, regularidade da transferência metálica e comportamento operacional do processo de soldagem, os quais se relacionam de forma muito próxima e complicada (SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

No meio fabril, o próprio soldador é responsável por avaliar a estabilidade do processo de forma empírica. Essa análise qualitativa apresenta algumas limitações, por variar de acordo com a habilidade de cada profissional e pelo fato de que a inspeção contra imperfeições do cordão soldado ser realizada apenas ao término do processo de soldagem. Estudos vêm sendo realizados a fim de quantificar a estabilidade da transferência metálica para analisar limites de conformidades mais criteriosos através de métodos estatísticos.

Apesar de vários trabalhos terem sido realizados na área até o momento, o uso de técnicas de monitoração é carente de pesquisa. Assim, seguindo a tendência tecnológica de equipamentos de uso prático e flexível, surge a ideia inovadora da criação de um monitor sem fio para avaliar a qualidade da solda em tempo real quantitativamente.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo geral analisar e avaliar o efeito da estabilidade da transferência metálica por curto-circuito no processo de soldagem GMAW aplicando o critério Laprosolda, visando atender os requisitos para um futuro projeto de monitoramento de soldagem em tempo real.

Como objetivos específicos, têm-se:

a) Elaborar um algoritmo para cálculo da faixa admissível de tamanho de gota em transferência por curto-circuito que possa ser implementado em um equipamento portátil;

- b) Apresentar diferentes formas de interpretar o Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência por Curto-Circuito para monitoramento da qualidade da solda em tempo real;
- c) Aplicar o Índice Vilarinho de Regularidade da Transferência para analisar a influência de diferentes atmosferas protetoras na estabilidade do arco elétrico variando o fluxo de gás, bem como a influência de curtos-circuitos incipientes.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho de conclusão de curso é dividido em cinco capítulos, são eles: Introdução, Revisão Bibliográfica, Materiais e Métodos, Resultados e Discussões e Conclusão. O primeiro capítulo aborda de forma geral e concisa os objetivos do trabalho bem como a motivação para o desenvolvimento da pesquisa. No segundo capítulo, os principais conceitos do processo de soldagem GMAW e o modo de transferência metálica por curto-circuito são apresentados. Além de descrever o critério Laprosolda utilizado para avaliar a estabilidade da transferência metálica, esse capítulo também abrange os estudos que já foram realizados aplicando esse mesmo critério. O terceiro capítulo aborda de maneira clara a programação do algoritmo proposto além dos materiais, equipamentos e procedimento experimental realizados no ensaio de laboratório. No capítulo quatro, a validação do método é apresentada juntamente com os dados de saída do programa. Os gráficos e resultados obtidos das diversas amostras soldadas são discutidos para melhor entendimento do leitor. Por fim, o capítulo cinco aborda as principais conclusões levantadas no desenvolvimento do trabalho.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 SOLDAGEM GMAW

A soldagem a arco com proteção gasosa, referenciada pela American Welding Society como GMAW (Gas Metal Arc Welding), é um processo de soldagem que promove a união de peças metálicas fundamentado na fonte de calor de um arco elétrico estabelecido entre a extremidade de um arame metálico nu consumível e a peça de trabalho a soldar. O processo de soldagem a arco com proteção gasosa também é conhecido pela nomenclatura MIG/MAG. Quando a proteção usada é constituída por um gás ou mistura inerte, adota-se a sigla MIG - Metal Inert Gas, já quando a mistura é rica em gases ativos denota-se MAG - Metal Active Gas.

A alimentação contínua do arame eletrodo no processo MIG/MAG é feita mecanicamente, através de um equipamento motorizado, o qual mantém a velocidade de alimentação e o comprimento do arco constante, garantindo a manutenção do arco. A soldagem pode ser aplicada de forma automática, quando o movimento da tocha é realizado por uma máquina, ou semiautomática, quando a tocha é conduzida manualmente pelo soldador (SCOTTI; PONOMAREV, 2008). Normalmente, uma fonte com característica estática de saída tipo tensão constante em conjunto com um alimentador de velocidade constante é utilizada na soldagem MIG/MAG convencional (as características estáticas da fonte se relacionam com os valores médios de tensão e corrente como resultado da aplicação de uma carga resistiva). Desta forma, a tensão e a velocidade do arame permanecem aproximadamente constantes em todo processo (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

O tipo de gás utilizado na soldagem GMAW influencia as características do processo, como a transferência metálica, a penetração, a largura e o formato do cordão de solda e as características do arco. As diferentes proporções das misturas de gases, tanto ativos quanto inertes, conferem melhores características ao cordão de solda em determinadas condições como mostra a figura 1 (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Gás ou mistura	Comportamento químico	Aplicações
Argônio	Inerte	Quase todos os metais, exceto aço
Hélio	Inerte	Al, Mg, Cu e suas ligas. Alta penetração
Ar + He (20 - 50%)	Inerte	Idem He, mas melhor que 100% He
Nitrogênio	—	Cobre, maior energia de soldagem
Ar + 20-30% N <sub>2</sub>	—	Idem N <sub>2</sub> , mas melhor que 100% N <sub>2</sub>
Ar + 1 - 2% O <sub>2</sub>	Ligeiramente oxidante	Aços inoxidáveis e algumas ligas de Cu
Ar + 3 - 5% O <sub>2</sub>	Oxidante	Aços carbono e alguns aços de baixa liga
CO <sub>2</sub>	Oxidante	Aços carbono e alguns aços de baixa liga
Ar + 20-50% CO <sub>2</sub>	Oxidante	Aços
Ar + CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	Oxidante	Aços

Figura 1: Gases e misturas usados na soldagem MIG/MAG  
 Fonte: Marques; Modenesi; Bracarense, 2011

De acordo com Okumura e Taniguchi (1982), o tipo de gás utilizado influencia no perfil do cordão de solda. Na soldagem com argônio observa-se um arco de soldagem constricto com uma penetração profunda na região sob o arco, porém inexpressiva nas áreas adjacentes. Ao adicionarmos CO<sub>2</sub> na mistura, a penetração sob o arco torna-se menos profunda e mais expressiva nas áreas adjacentes. Quando se passa a utilizar CO<sub>2</sub> puro, nota-se uma penetração uniforme e razoavelmente profunda sob toda a área abrangida pelo arco. A figura 2 ilustra os perfis típicos de cordões de solda em função do gás de proteção.

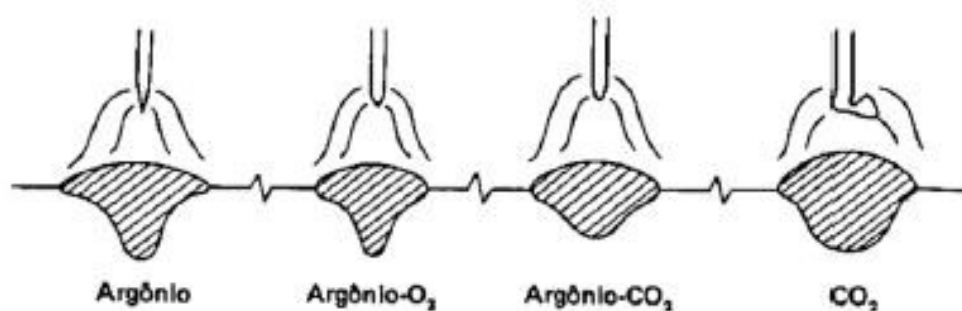


Figura 2: Diferenças em penetração, em função de diferentes gases e misturas  
 Fonte: Okumura; Taniguchi, 2011



Marques, Modenesi e Bracarense (2011) afirmam que o modo como o metal fundido na ponta do eletrodo se transfere para a poça de fusão tem grande importância na soldagem MIG/MAG, visto que muitas características do processo são afetadas. A estabilidade do arco, a aplicabilidade do processo em determinadas posições de soldagem, a quantidade de gases absorvida pelo metal fundido e o nível de respingos são exemplos da influência da transferência metálica. Segundo os autores, três diferentes modos naturais de transferência de metal de adição do eletrodo para a peça podem ocorrer: transferência metálica por curto-circuito, transferência metálica globular e transferência goticular ou por spray.

O critério Laprosolda, utilizado no presente trabalho, é empregado apenas para o processo de transferência metálica por curto-circuito. Para melhor compreensão, esse processo de transferência será explicado detalhadamente no tópico a seguir.

## 2.2 TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-CIRCUITO

A transferência por curto-circuito acontece normalmente quando baixos valores de tensão e corrente são utilizados no processo. Uma gota de metal se forma na ponta do eletrodo e cresce de tamanho até atingir a poça de fusão em decorrência da tensão superficial, ocasionando um curto-circuito elétrico e a extinção momentânea do arco. A figura 3 ilustra o comportamento dos sinais de corrente e de tensão durante este modo de transferência. Nota-se que a tensão cai abruptamente quando a gota metálica toca a poça de fusão, permanecendo baixa até o fim do curto-circuito, enquanto a corrente aumenta rapidamente, decaindo após a extinção do arco (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

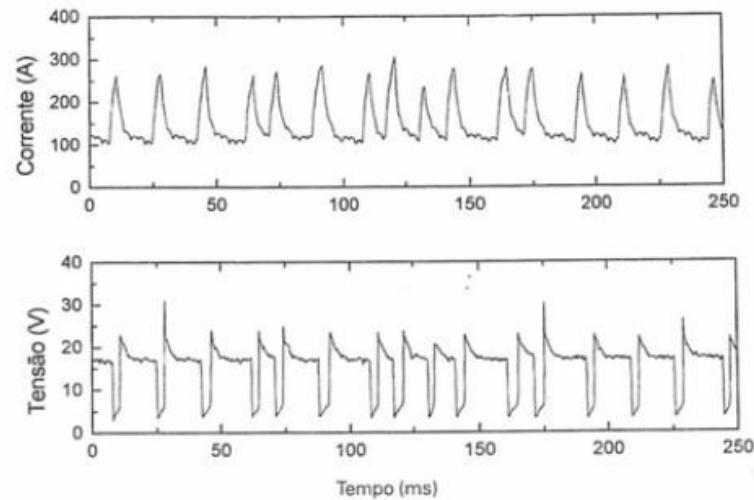


Figura 3: Comportamento da tensão e corrente na transferência por curto-circuito  
 Fonte: Marques; Modenesi; Bracarense, 2011

Scotti e Ponomarev (2008) complementam que imediatamente após o rompimento do curto-circuito, o comprimento do arco cresce rapidamente, enquanto uma nova gota começa a se formar na ponta do arame-eletrodo. Ainda segundo os autores:

Nos primeiros milissegundos após a reabertura de arco, as taxas de fusão e de alimentação se igualam, devido à redução de corrente, para em seguida, ainda sob ação do arco, a primeira se tornar um pouco menor do que a de alimentação, fazendo a ponta do arame aproximar-se gradualmente da poça. Mas isto não significa que durante a fase restante de arco aberto haja uma aproximação progressiva da gota à poça de fusão, ou seja, uma redução gradual do comprimento de arco. Oscilações mútuas da gota (que está em crescimento permanente, acumulando o metal fundido) e da superfície da poça acarretam alterações do comprimento de arco ao redor de um valor médio de 1 a 2 mm, até um novo curto-circuito acontecer.

O grau de aleatoriedade na transferência por curto-circuito é refletido na variabilidade da duração dos tempos de arco aberto e de curto-circuito. Observa-se que, em condições adversas, há a ocorrência de curtos-circuitos incipientes, na qual o eletrodo toca a poça de soldagem por um curto período de tempo sem transferência de metal. Scotti e Ponomarev (2008) reiteram que a natureza dos curtos incipientes está relacionada com o movimento caótico da superfície da poça de fusão e da gota formada na ponta do eletrodo. As instabilidades refletidas pela natureza randômica do processo por curto-circuito aumentam a quantidade de respingos no cordão de solda. Contudo, a quantidade de respingos pode ser

limitada pela seleção adequada dos parâmetros de soldagem tais como: corrente, tensão, efeito indutivo, vazão e composição do gás de proteção.

### 2.3 CRITÉRIO LAPROSOLDA

O Grupo Laprosolda visando quantificar a estabilidade no processo de transferência metálica por curto-circuito na soldagem GMAW estabeleceu um critério baseado em dois parâmetros: o Índice Vilarinho de Regularidade da transferência em curto-circuito ( $IV_{cc}$ ) e a faixa admissível de tamanho de gota em transferência por curto-circuito ( $\Delta F_{cc}$ ).

O primeiro parâmetro baseia-se na premissa de que a estabilidade da transferência metálica por curto-circuito está ligada com a constância dos tempos em curto-circuito e em arco aberto. Quanto menor a variação dos tempos tanto em curto-circuito como em arco aberto, mais estável é o processo. O índice de regularidade  $IV_{cc}$  é então determinado pela equação 1:

$$IV_{cc} = \frac{\sigma_{tcc}}{t_{cc}} + \frac{\sigma_{tab}}{t_{ab}} \quad (1)$$

onde:  $\sigma_{tcc}$  = desvio padrão da média do tempo de curto-circuito;  $\sigma_{tab}$  = desvio padrão da média do tempo de arco aberto;  $t_{cc}$  = média do tempo de curto-circuito;  $t_{ab}$  = média do tempo de arco aberto.

O segundo parâmetro refere-se a faixa admissível de tamanho de gota em transferência por curto-circuito, ou seja, cada gota ao se destacar deve apresentar um volume apropriado para garantir a transferência metálica por curto-circuito. Assim, uma gota não deve crescer muito antes de se destacar, porém deve apresentar um volume mínimo. Em outras palavras, gotas muito grandes não caracterizam uma condição adequada para transferência por curto-circuito e abaixo de certa frequência a transferência metálica sucede de um processo combinado conhecido como globular/curto-circuito, apresentando gotas grosseiras. Segundo o Grupo Laprosolda, medir tamanho médio de gota é uma tarefa laboriosa e requer equipamentos especiais. Alternativamente, foi proposta a equação numérica 2 para estimar a faixa de volume ideal por meio do cálculo das frequências máximas e mínimas cujo modelo é apresentado a seguir.

$$\Delta F_{CC} = \frac{v_a \times d^2}{(k \times d)^3} \quad (2)$$

onde:  $d$  = diâmetro do arame-eletrodo em milímetros;  $V_a$  = velocidade de alimentação de arame em milímetros por segundo;  $k$  = fator de multiplicação para estimar o diâmetro da gota em função do diâmetro do arame.

O fator  $k$  é dependente do material do arame e do gás de proteção, sendo especificado arbitrariamente pelos autores, observando a transferência metálica por curto-circuito. (REZENDE *et al.*, 2011).

## 2.4 ESTADO DA ARTE

Segundo Hermans & Den Ouden (1999), um dos principais problemas na soldagem GMAW por curto-circuito é o comportamento instável do processo acompanhado pela formação de respingos. Os curtos-circuitos instantâneos ou incipientes, a variação da velocidade de alimentação do arame e a falha de reignição do arco elétrico são três fatores determinantes na instabilidade em transferência por curto-circuito. Dutra *et al.* (1995) desenvolvem um software para auxiliar na análise da estabilidade da transferência metálica na soldagem MIG/MAG por curto-circuito. Os autores classificam a estabilidade na transferência por curto-circuito como a regularidade na formação e na separação de gotas metálicas. Em seguida, avalia-se a indicação quantitativa da regularidade no processo através da análise estatística de oscilogramas de tensão e corrente, permitindo identificar ocorrências de curtos-circuitos incipientes (sem transferência de gotas).

Filho, Bálamo e Ferraresi (2007) constataam, em seus estudos sobre a influência do tipo de gás de proteção na qualidade do cordão de solda na soldagem GMAW, que há um aumento da frequência de curto-circuito quando os gases  $O_2$  ou  $CO_2$  são adicionados na mistura com argônio, como mostra a tabela 1. Ainda, os autores verificam um aumento na quantidade de escória no cordão de solda quando esses gases de proteção são adicionados na mistura. Souza *et al.* (2011) avaliam a estabilidade da transferência metálica sob a influência da regulagem de parâmetros de soldagem no processo MIG/MAG curto-circuito. Os autores ratificam que o gás de proteção influencia a regularidade do processo, segundo eles a transferência fica menos estável para maior teor de  $CO_2$ .

Tabela 1 - Influência do tipo de gás de proteção para três diferentes tipos de arame eletrodo na Fcc

Teste	Gás	Arame	V <sub>ALIM</sub> [m/min]	V <sub>SOLD</sub> [cm/min]	DBCP	I <sub>M</sub> [A]	U <sub>M</sub> [V]	f <sub>cc</sub> [Hz]
1	Ar	ER430	5,3	20	12	172	19,9	150,0
2	Ar + 2% O <sub>2</sub>	ER430	5,3	20	15	173	19,9	133,3
3	Ar + 4% O <sub>2</sub>	ER430	5,3	20	17	171	19,9	196,7
4	Ar + 2% CO <sub>2</sub>	ER430	5,3	20	14	172	19,9	200,0
5	Ar + 4% CO <sub>2</sub>	ER430	5,3	20	15	174	20,0	153,3
6	Ar + 8% CO <sub>2</sub>	ER430	5,3	20	16	172	20,0	210,0
7	Ar	ER430Ti	7,6	20	12	172	20,0	40,0
8	Ar + 2% O <sub>2</sub>	ER430Ti	7,6	20	14	169	19,9	55,3
9	Ar + 4% O <sub>2</sub>	ER430Ti	7,6	20	14	173	20,0	61,3
10	Ar + 2% CO <sub>2</sub>	ER430Ti	7,6	20	14	170	20,0	54,0
11	Ar + 4% CO <sub>2</sub>	ER430Ti	7,6	20	13	173	20,0	74,7
12	Ar + 8% CO <sub>2</sub>	ER430Ti	7,6	20	13	170	20,0	95,3
13	Ar	ER430LNb	7,6	20	10	171	19,9	120,0
14	Ar + 2% O <sub>2</sub>	ER430LNb	7,6	20	12	169	19,9	116,7
15	Ar + 4% O <sub>2</sub>	ER430LNb	7,6	20	12	172	19,9	133,3
16	Ar + 2% CO <sub>2</sub>	ER430LNb	7,6	20	11	169	19,9	136,7
17	Ar + 4% CO <sub>2</sub>	ER430LNb	7,6	20	10	173	19,9	133,3
18	Ar + 8% CO <sub>2</sub>	ER430LNb	7,6	20	12	170	20,0	180,0

Fonte: Filho; Bálsamo; Ferraresi, 2007

Rezende *et al.* (2011) realizam uma análise quantitativa da regularidade da transferência metálica para regulagem de parâmetros no processo MIG/MAG operando em curto-circuito. O estudo avalia a aplicação do critério Laprosolda para quantificar a estabilidade do arco e regularidade da transferência por curto-circuito na soldagem GMAW. Para isso, foram obtidos cordões de solda com comprimentos de arcos desde muito curtos a muito longos, variando a tensão de regulagem na fonte (16, 17, 18, 19, 20, 22 e 24 volts). Posteriormente, o rendimento de deposição, o IV<sub>cc</sub>, a geometria do cordão e a frequência de curto-circuito foram medidos. Observou-se que a frequência das transferências (F<sub>cc</sub>) cresce à medida que a tensão diminui como mostra a tabela 2. Porém para valores muito altos de tensão (22 e 24V), apesar de se notar alta regularidade na transferência, a transferência metálica passa de curto-circuito para globular, devido às baixas frequências examinadas. Exigindo, assim, um critério de corte pela frequência para se adequar ao processo MIG/MAG por curto-circuito, como ilustra a figura 4. Os resultados apontaram que um cordão de solda com convexidade adequada e com maior área fundida e maior penetração ocorre em transferências mais regulares. Os autores concluíram que o Índice Vilarinho de Regularidade (IV<sub>cc</sub>) é efetivo na avaliação de regulagens de soldagem MIG/MAG com o objetivo de otimizar o acabamento do cordão de solda e minimizar respingos.

Tabela 2 - Resultados gerais para os rendimentos, frequências de curtos-circuitos e Índice de Regularidade

Tensão (V)	Rend.	Freq. Min. [Hz]	Freq. [Hz]	Freq. Máx. [Hz]	IVcc
16	95,0%	23,7	43,2	34,3	0,7
17	95,8%	23,7	37,0	34,3	0,6
18	96,6%	23,7	27,8	34,3	0,4
19	95,9%	23,7	23,6	34,3	0,5
20	95,3%	23,7	18,0	34,3	0,5
22	94,9%	23,7	4,5	34,3	0,8
24	94,1%	23,7	3,0	34,3	0,7

Fonte: Rezende *et al.*, 2011

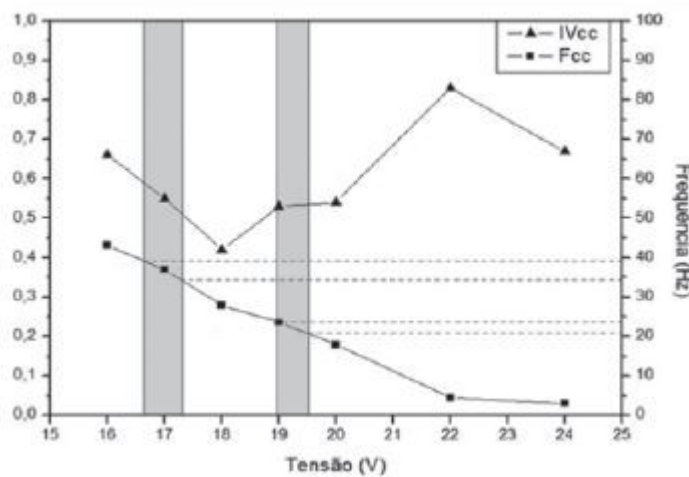


Figura 4: Faixas de transição dos limites superiores e inferiores da tensão de soldagem em que os IVcc são aceitáveis, em função das faixas de frequência máxima e mínima adequadas para haver a transferência com estabilidade

Fonte: Rezende *et al.*, 2011

Fernandes *et al.* (2010), em seu ensaio para medição de nível de respingos na soldagem MIG/MAG por curto-circuito, apontam que é possível haver índices de regularidades (IVcc) semelhantes na transferência metálica para uma faixa operacional de diferentes níveis de tensão média. Segundo Souza *et al.* (2011), dentro dessa faixa, valores de tensão mais altos são constatados para misturas à base de argônio mais ricas em CO<sub>2</sub>. Costa *et al.* (2014) propõem um programa que avalia, por meio de processamento de imagens, a regularidade do aspecto superficial e das bordas de cordões de solda. O Índice de Regularidade (IVcc) em conjunto com os valores de frequências que representam uma transferência adequada por curto-circuito foram determinados para confrontar os resultados das análises da qualidade superficial do cordão. Os autores analisaram os coeficientes de variação de tempo de arco aberto ( $\sigma_{tab}/tab$ ) e do tempo de curto-circuito ( $\sigma_{tcc}/tcc$ )

separadamente. Constatou-se que as curvas dos coeficientes de variação dos tempos de arco aberto e de curto-circuito apresentaram comportamentos muito similares às curvas do índice de regularidade ( $IV_{cc}$ ), como ilustra a figura 5. Entretanto, os valores do índice baseado no coeficiente de variação do tempo de curto-circuito apresentam uma leve tendência à maior regularidade, diminuindo o valor de  $IV_{cc}$ . Os autores também ressaltaram que para uma condição adequada de soldagem por curto-circuito, na qual uma melhor regularidade da transferência metálica assim como uma melhor qualidade superficial do cordão de soldagem são observadas, a tensão de regulagem deve apresentar valores entre 15 e 19V.

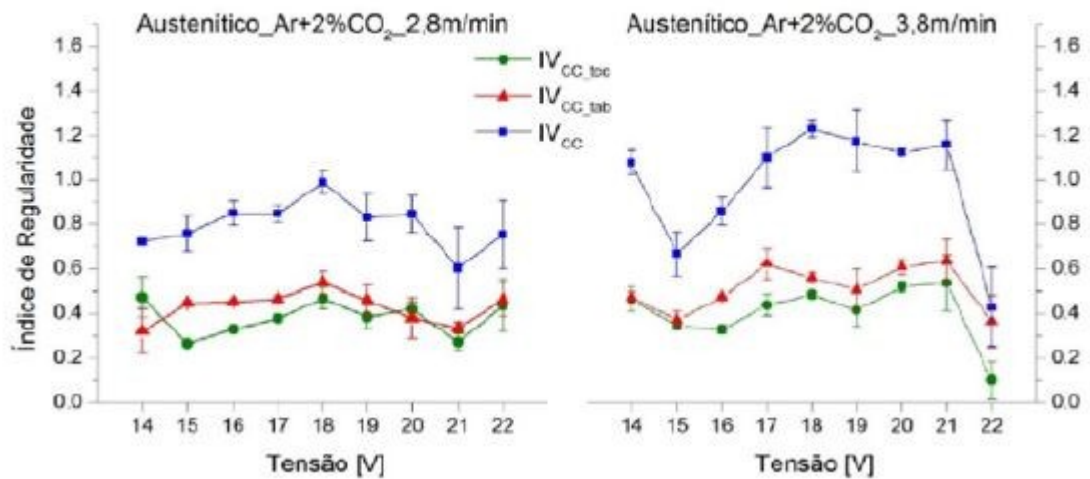


Figura 5: Comparação do índice de regularidade com os coeficientes de variação do tempo de curto-circuito e do tempo de arco aberto em função da tensão de soldagem

Fonte: Costa *et al.*, 2014

Mendes (2016) desenvolve um algoritmo para monitoramento da soldagem GMAW operando em curto-circuito, utilizando o Índice Vilarinho de regularidade ( $IV_{cc}$ ) como critério para avaliar a qualidade da solda. Carvalho (2016) estuda, concomitantemente a Mendes (2016), a influência do Índice Vilarinho de Regularidade da transferência em curto-circuito na estabilidade do arco elétrico no processo GMAW curto-circuito. O estudo analisa a regularidade da transferência para dois tipos de gases de proteção (Argônio puro e 80% Argônio - 20% CO<sub>2</sub>) empregando diferentes vazões de gases de proteção: 2, 4, 6, 8 e 16 l/min. Carvalho (2016) conclui que a soldagem com maior estabilidade é observada para a maior vazão empregada (16 l/min). Isto é, ambas as amostras apresentam menores valores de  $IV_{cc}$ . Entretanto, nota-se que a atmosfera formada por argônio puro é mais estável se comparada a mistura de 80% Argônio - 20% CO<sub>2</sub>, apresentando menores índices de regularidade.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 DEFINIÇÃO DO ALGORITMO

Para quantificar a estabilidade da transferência metálica no processo de soldagem MIG/MAG por curto-circuito, é proposto um algoritmo para cálculo da faixa admissível de tamanho de gota em transferência por curto-circuito. O algoritmo em questão é dividido em duas partes: a primeira parte considera todos os curtos-circuitos ocorridos no processo de soldagem e retorna como saída a frequência média de curto-circuito do sinal, enquanto que a segunda filtra os curtos-circuitos incipientes para posteriormente calcular a frequência média de curto-circuito do sinal. Para melhor esclarecimento, as figuras 6 e 7 representam a programação em uma linguagem simples no formato de pseudocódigo.

---

Frequência Média de Curto-Circuito

---

```

função FCC(ID,name,time,voltage,minheight)
  Definir: intervalo de tempo entre leituras, tamanho da matriz de tempo e
  contadores
  enquanto contador de varredura de dados  $\leq$ 
  tamanho da matriz de tempo faça
    se vetor tensao < tensao de corte de finida então
      contagem de curto-circuito
      construa o vetor tempo de curto-circuito
    senão
      contagem de arco aberto
      construa o vetor tempo de arco aberto
    fim se
  fim enquanto
  Calcule o periodo de cada ciclo e armazene em um novo vetor periodo
  Calcule a media do vetor periodo
  Calcule a frequencia do sinal
  Imprime Fcc
fim função

```

---

Figura 6: Algoritmo Frequência Média de Curto-Circuito (parte 1)  
 Fonte: Do autor



---

Frequência Média de Curto-Circuito Sem Curtos Incipientes

---

```

função FCCSEMINCIPIENTES(ID,name,time,voltage,minheight)
  Definir: intervalo de tempo entre leituras, tamanho da matriz de tempo e
  contadores
  enquanto contador de varredura de dados ≤ tamanho da matriz de tempo faça
    se vetor tensao < tensao de corte definida então
      contagem de curto-circuito
      construa o vetor tempo de curto-circuito
    senão
      contagem de arco aberto
      construa o vetor tempo de arco aberto
    fim se
  fim enquanto
  enquanto contador auxiliar < tamanho do vetor tempo de curto –
  circuito faça
    se contador auxiliar < tempo de curtos incipientes (2ms) então
      Retire os dados com curtos incipientes
    fim se
  fim enquanto
  Calcule o periodo de cada ciclo e armazene em um novo vetor periodo
  (sem incipientes)
  Calcule a media do vetor periodo (sem incipientes)
  Calcule a frequencia do sinal, desconsiderando os curtos incipientes
  Imprime Fcc
fim função

```

---

Figura 7: Algoritmo Frequência Média de Curto-Circuito retirando-se os curtos incipientes (parte 2)

Fonte: Do autor

A plataforma MATLAB foi utilizada para a programação do algoritmo referido. Primeiramente, fez-se necessário definir, como dado de entrada, o limite de tensão para que o processo de soldagem fosse considerado em curto-circuito. Definiu-se que para valores de tensão acima de 10V, o processo é considerado em arco aberto e, para valores abaixo disso, o processo é considerado em curto-circuito. Os fluxogramas ilustram passo a passo a natureza do processo: a figura 8 representa o processo de implementação do algoritmo incluindo todos os curtos-circuitos, enquanto que a figura 9 desconsidera os curtos incipientes.

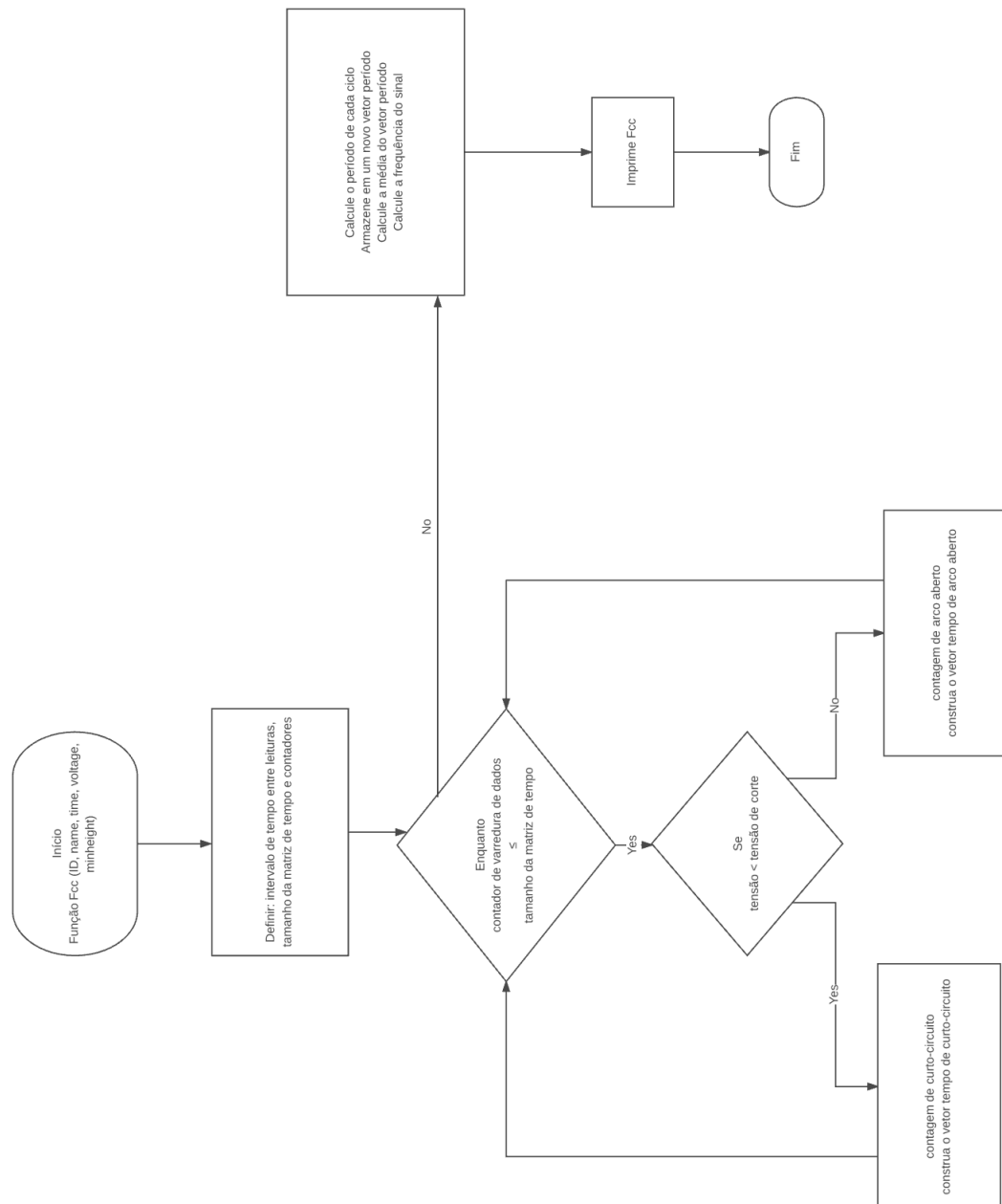


Figura 8: Fluxograma do algoritmo Frequência Média de Curto-Circuito (parte 1)  
Fonte: Do autor

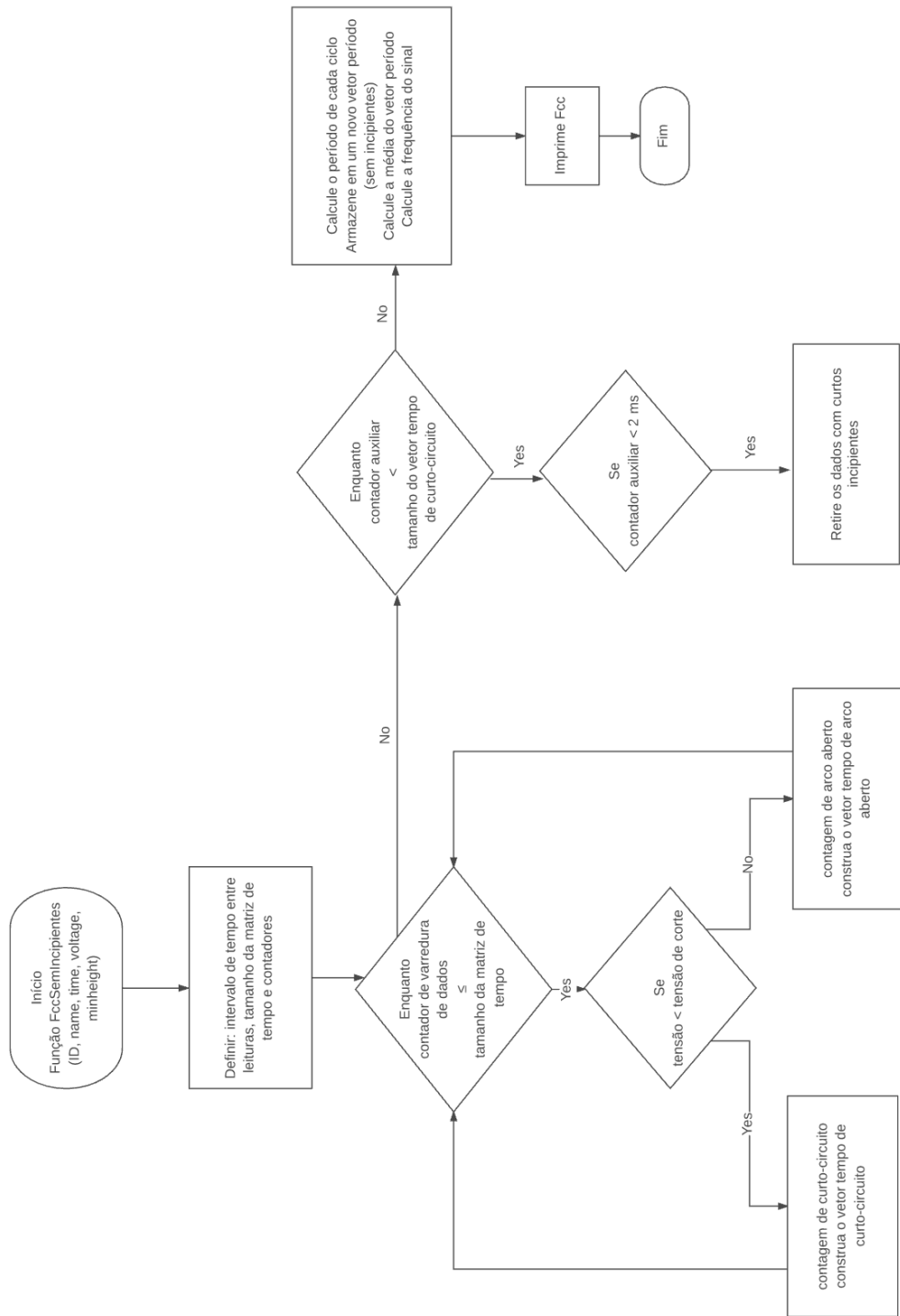


Figura 9: Fluxograma do algoritmo Frequência Média de Curto-Circuito retirando-se curtos incipientes (parte 2)  
Fonte: Do autor

### 3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para execução dos experimentos, soldagens de simples deposição na posição plana sobre chapas de aço SAE 1020, com espessura de 6,30 mm e largura de 31,90 mm, foram realizadas no laboratório de soldagem da Faculdade de Engenharia da UFJF. As peças de aço carbono foram lavadas com álcool etílico para remoção de resíduos oleosos oriundos do processo de corte e fabricação das mesmas. Utilizou-se o arame-eletrodo AWS ER70S-6 com diâmetro de 1,0 mm para três variações do gás de proteção: argônio puro, mistura composta por 80% de Ar e 20% de CO<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> puro. A distância bico de contato peça foi conferida antes da realização de cada experimento e mantida constante em 12 mm.

A fonte de soldagem utilizada foi um equipamento de uso comercial modelo DIGIPlus A7, do fabricante IMC, configurada para operar no modo de processo de soldagem MIG/MAG convencional, com tensão constante definida em 18V, velocidade de alimentação nominal regulada em 3,5 m/min e polaridade inversa. Entretanto, um tacômetro mediu a velocidade de alimentação real, registrando um valor de 3,0 m/min. A tocha de soldagem foi posicionada perpendicularmente à chapa a ser soldada e a mesma foi movimentada de forma mecanizada por um tartilope, modelo V2F, configurado com velocidade de soldagem de 30 cm/min.

Realizou-se um passe por chapa, variando o fluxo de gás em: 4 l/min, 6 l/min, 8 l/min, 10 l/min, 16 l/min e 22 l/min, exceto quando o gás de proteção utilizado foi o CO<sub>2</sub>. Para este, apenas um passe por chapa foi realizado repetidamente com o parâmetro vazão de gás definido em 16 l/min.

Para a vazão de gás regulada em 10 l/min, foram realizados dois ensaios diferentes, pois trata-se do valor cerne dos parâmetros em questão. Comumente, trabalha-se com vazões equivalentes a 10 vezes o diâmetro do eletrodo. A figura 10 ilustra o acabamento dos quatorze cordões de soldas produzidos. Previamente ao início de cada experimento, foi realizado o teste de vazão de gás para leitura correta do valor estipulado. O sistema de aquisição de dados foi o instrumento utilizado para as medições de parâmetros como fluxo de gás definido, tensão, corrente e velocidade de alimentação instantânea.



Figura 10: Cordões de solda  
Fonte: Do autor

Os dados adquiridos pelo sistema de aquisição de dados foram importados para arquivos no formato “.m” para serem manipulados no software MATLAB. Devido às instabilidades no processo de soldagem por curto-circuito nos tempos iniciais e finais de cada cordão de solda, os dados foram filtrados numa mesma faixa de variação entre 5s a 30s para posteriormente serem analisados. Em seguida, o algoritmo desenvolvido calculou a frequência de curto-circuito para cada passe. Posteriormente, o algoritmo proposto por Mendes (2016) foi adaptado pelo autor do presente trabalho para calcular o Índice Vilarinho de Regularidade em três diferentes aspectos: IVcc Dinâmico, IVcc Acumulativo e IVcc Médio. Por fim, calcula-se o IVcc Dinâmico excluindo-se os curtos incipientes. Por se tratar de um ensaio com fins científicos, os experimentos foram realizados de forma aleatória. A tabela 3 mostra a ordem do processo de soldagem.

Tabela 3 – Ordem do processo de soldagem

Ordem dos Experimentos													
M10A	A10A	C16A	M4A	A4A	A16A	M10B	M16A	C16B	A10B	M22A	A8A	A22A	M8A

onde a primeira letra refere-se ao tipo de gás de proteção utilizado ( A: Argônio puro, C: CO<sub>2</sub> e M: mistura composta por 80% Ar e 20% CO<sub>2</sub>), o número indica o fluxo de gás em [l/min] e a segunda letra aponta a ocorrência do passe de soldagem para distinguir amostras realizadas com parâmetros (composição do gás de proteção e fluxo de gás) equivalentes.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 VALIDAÇÃO DO ALGORITMO

De acordo com Aghazadeh *et al.* (2005) citados por Mendonça (2015), zero crossing é uma técnica para estimar a frequência de um sinal. Fundamentalmente, o método consiste em detectar os instantes em que ocorre a alteração do sinal de positivo para negativo ou vice versa. Assim, o algoritmo detecta o primeiro instante em que há a ocorrência de alteração de sinal. Imediatamente, identifica a segunda alteração. Desta forma, obtêm-se dois instantes em que o sinal passa pela amplitude nula consecutivamente. O tempo entre esses dois instantes representa o semi-período do sinal, como ilustra a figura 11.

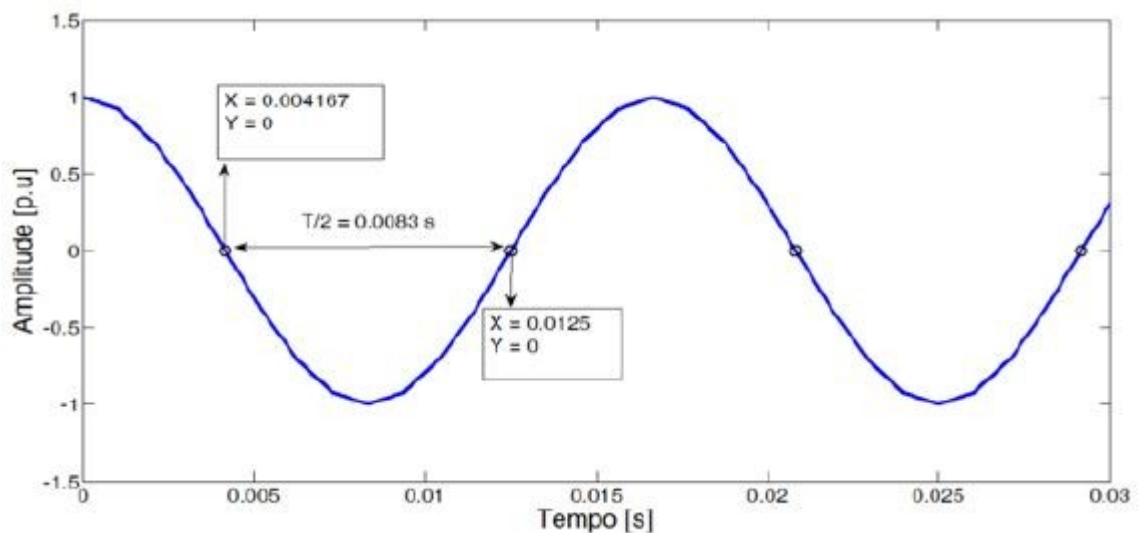


Figura 11: Cálculo de frequência considerando passagens consecutivas por zero  
Fonte: Mendonça, 2015

A técnica zero crossing é utilizada no presente trabalho para validar o algoritmo de cálculo da frequência média do sinal. Inicialmente, faz-se a aquisição do sinal de tensão no tempo e o gráfico do sinal é gerado, nesse caso utilizamos os sinais de entrada da amostra de Ar puro 22 l/min, escolhida aleatoriamente. Como é estabelecido que para valores de tensão abaixo de 10V o processo é considerado em curto-circuito, deslocam-se os dados de voltagem verticalmente em 10 unidades para baixo no gráfico para adaptar os dados ao método em questão, conforme ilustra a figura 12.

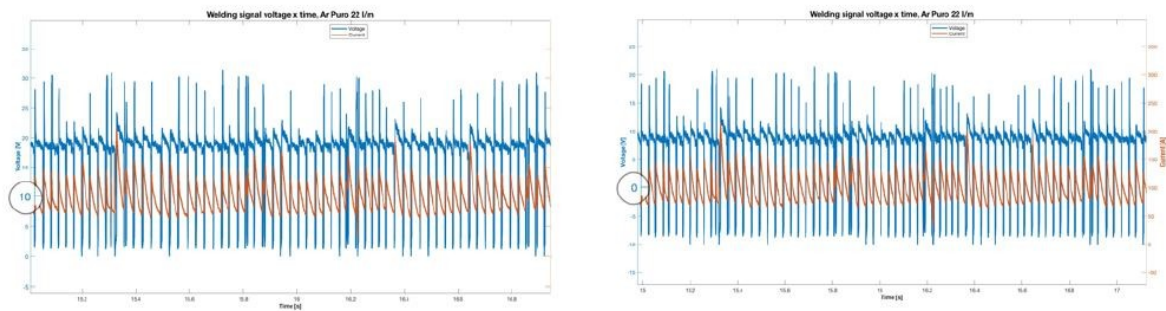


Figura 12: Sinais de tensão x tempo  
Fonte: Do autor

Aplica-se o algoritmo zero crossing utilizando o software Matlab. Sabe-se que o sinal de soldagem não é periódico. Isto posto, define-se que um ciclo é completo a cada três instantes em que o sinal passa pelo valor zero consecutivamente. O tempo entre esses instantes consecutivos representa o período de cada ciclo. Posteriormente, a frequência média do sinal é calculada, como ilustra a figura 13.

```

Command Window
>> load('Ar.mat');
zcd = dsp.ZeroCrossingDetector;
voltage = a22a(:,2) - 10;
numZeroCross = step(zcd,voltage);
time = (a22a(end,1) - a22a(1,1));
Fcc = (numZeroCross/2)/time;
fprintf('A Fcc do sinal é: %.2f Hz\n', Fcc);
A Fcc do sinal é: 36.00 Hz
fz >> |

```

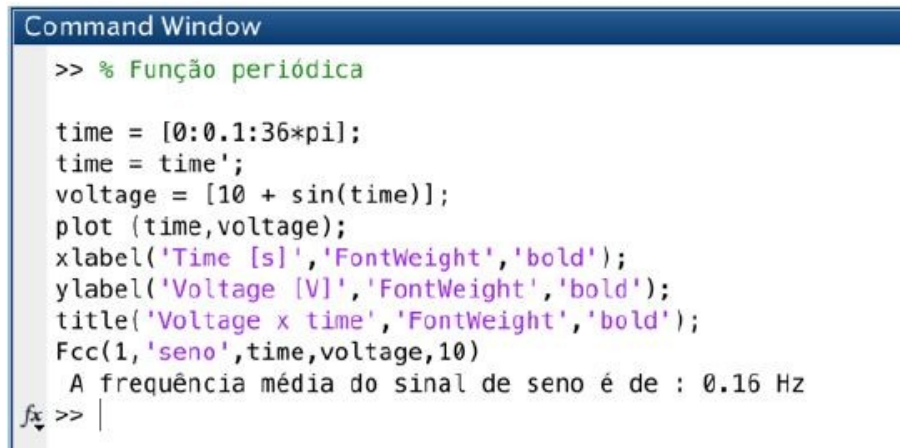
Figura 13: Frequência de curto-circuito pelo método zero crossing  
Fonte: Do autor

Nota-se que a frequência de curto-circuito para a amostra de Ar puro 22 l/min é praticamente a mesma daquela retornada pelo algoritmo proposto no presente trabalho (Fcc para Ar puro 22 l/min equivalente a 36,06 Hz). Portanto, o resultado valida o algoritmo desenvolvido.

Outra forma para validação do algoritmo proposto consiste na implementação de uma função periódica como dado de entrada. Aplica-se como exemplo a função  $y = 10 + \sin(x)$ . Sabe-se que o período equivale a  $2\pi$  e a frequência é o inverso do período da função, cujo valor em duas casas decimais é equivalente a 0,16 Hz. Mantém-se o valor 10 como o limiar entre arco aberto e curto-circuito. Em seguida, utiliza-se a função frequência média de



corrente. O dado de saída do algoritmo retorna o mesmo valor de frequência conforme ilustra a figura 14.



```

Command Window
>> % Função periódica

time = [0:0.1:36*pi];
time = time';
voltage = [10 + sin(time)];
plot (time,voltage);
xlabel('Time [s]','FontWeight','bold');
ylabel('Voltage [V]','FontWeight','bold');
title('Voltage x time','FontWeight','bold');
Fcc(1,'seno',time,voltage,10)
A frequência média do sinal de seno é de : 0.16 Hz
fx >> |
  
```

Figura 14: Cálculo de frequência considerando uma função periódica  
Fonte: Do autor

## 4.2 FREQUÊNCIA DE CURTO-CIRCUITO

Para avaliar o efeito da estabilidade da transferência metálica por curto-circuito por meio do Índice de Regularidade, calculou-se, primeiramente, a frequência média de curto-circuito de cada amostra soldada, inclusive considerando os curtos incipientes. A tabela 4 foi desenvolvida para facilitar a análise dos resultados para os corpos de provas produzidos.

Tabela 4: Frequências de curto-circuito

Vazão [l/min]	Fcc [Hz]	
	Argônio puro	80% Ar - 20% CO <sub>2</sub>
4	46,27	60,30
8	39,20	55,71
10	33,09	55,49
10(b)	31,62	56,28
16	37,27	54,03
22	36,06	54,89

Pela tabela 4, é possível perceber que a frequência de curto-circuito é estreitamente dependente do gás de proteção. Essa aumenta quanto maior for o teor de CO<sub>2</sub> utilizado no gás de proteção. Assim, as menores frequências de curto-circuitos são observadas para argônio puro, já os maiores valores de Fcc são encontrados quando o gás de proteção é coberto pela atmosfera composta por 80%Ar e 20% CO<sub>2</sub>. Ainda, observa-se que para a menor vazão de gás (4 l/min), as frequências de curto-circuito apresentam seus maiores valores.

Em seguida, o cálculo da frequência média de curto-circuito foi realizado excluindo-se os curtos incipientes. A priori, frequências médias de curto-circuito sem curtos incipientes devem apresentar menores valores se comparadas com as Fcc incluindo todos os curtos-circuitos. Isso se deve ao fato de que ao retirar-se os curtos incipientes, cuja duração é muito pequena (menor que 2 ms), a ocorrência de ciclos é diminuída, conseqüentemente, a frequência média também é reduzida. As tabelas 5 e 6 ratificam essa afirmação para os diferentes gases de proteção utilizados. Pode-se verificar que a variação percentual é maior quando o gás CO<sub>2</sub> é adicionado na composição da atmosfera protetora. A figura 15 ilustra a variação percentual da frequência de curto-circuito com e sem curtos incipientes para as diferentes vazões de gás empregadas no processo de soldagem.

Tabela 5: Frequências de curto-circuito com e sem curtos incipientes para Ar puro

Fcc [Hz]			
Vazão [l/min]	Argônio puro	Argônio puro (sem incipientes)	$\Delta F_{cc}$ [%]
4	46,27	44,63	-3,5%
8	39,20	38,40	-2,0%
10	33,09	32,71	-1,1%
10(b)	31,62	31,45	-0,5%
16	37,27	36,55	-1,9%
22	36,06	35,56	-1,4%

Tabela 6: Frequências de curto-circuito com e sem curtos incipientes para 80% Ar - 20% CO<sub>2</sub>

Fcc [Hz]			
Vazão [l/min]	80% Ar - 20% CO <sub>2</sub>	80% Ar - 20% CO <sub>2</sub> (sem incipientes)	$\Delta F_{cc}$ [%]
4	60,30	57,91	-4,0%
8	55,71	54,92	-1,4%
10	55,49	53,56	-3,5%
10(b)	56,28	55,57	-1,3%
16	54,03	52,96	-2,0%
22	54,89	50,70	-7,6%

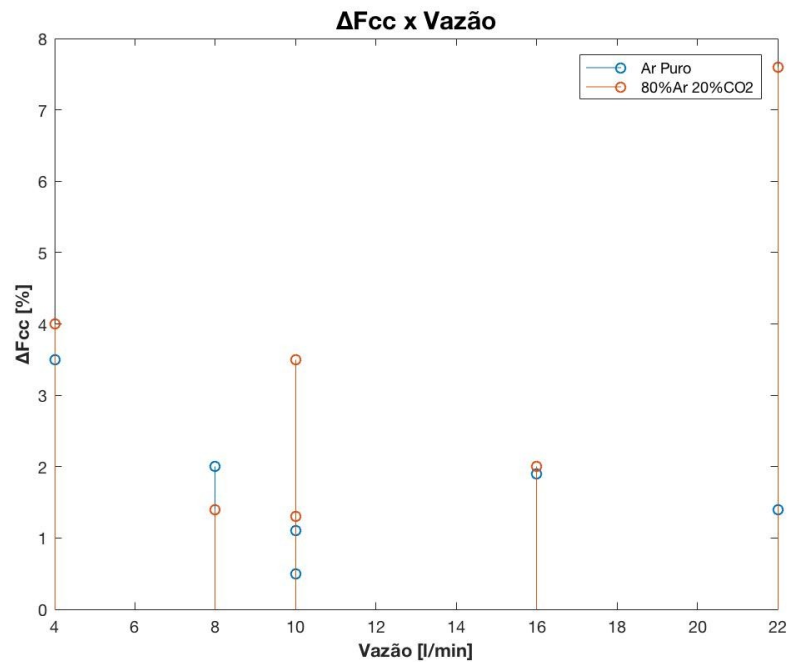


Figura 15:  $\Delta F_{cc}$  x Fluxo de Gás  
Fonte: Do autor

Por fim, calcula-se a frequência mínima e máxima de corte expressa pela equação 2. Sabe-se que o arame-eletrodo tem diâmetro de 1 mm, a velocidade de alimentação nominal é igual à 3,5 m/min e o fator de multiplicação  $k$  é dependente do material do arame e do gás de proteção, sendo especificado arbitrariamente pelo grupo Laprosolda, observando a transferência metálica por curto-circuito. Define-se que para a frequência mínima, a gota fundida deve apresentar diâmetro entre 1,30 e 1,35 vezes maior que o diâmetro do arame. Por outro lado, o fator de multiplicação para estimar o diâmetro da gota deve variar entre 1,10 e 1,15 para determinação da frequência máxima. Entretanto, esses valores demandam mais investigações (REZENDE *et al.*, 2011).

Em posse desses valores, calculam-se os limites da variação de frequência. As  $F_{cc}$  mínima e máxima são iguais a 23,7 Hz e 43,8 Hz, respectivamente. Nota-se que apenas as amostras de Ar puro, com exceção do fluxo regulado em 4 l/min, encontram-se dentro desses limites. Porém, como mencionado por Rezende *et al.* (2011), o valor de  $k$  ainda precisa ser mais bem determinado com filmagens de alta velocidade para diferentes combinações arame/gás de proteção. Assim, não se pode dizer que os valores de frequência média de curto-circuito invalidam a análise da regularidade da transferência metálica.

### 4.3 ÍNDICE VILARINHO DE REGULARIDADE DA TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO

Conforme definido no capítulo 2, o Índice Vilarinho de Regularidade é determinado por intermédio dos coeficientes de variação dos tempos de curto-circuito e de arco aberto. Segundo a equação 1, observa-se uma maior estabilidade da transferência metálica quando os tempos de curto-circuito e arco aberto são constantes, indicando, assim, menores valores de  $IV_{cc}$ .

Visando um futuro monitor por soldagem por curto-circuito, esse índice pode apresentar três diferentes interpretações, as quais serão definidas e analisadas a seguir.

#### 4.3.1 $IV_{cc}$ Dinâmico

O conceito de  $IV_{cc}$  Dinâmico é proposto para avaliação em tempo real do processo de soldagem. Dessa maneira, o cálculo dos coeficientes de variação dos tempos de curto-circuito e arco aberto é realizado a cada intervalo de 1 segundo de soldagem, desprezando valores residuais de  $IV_{cc}$  para instantes anteriores. Em outras palavras, registra-se um novo valor do Índice de Regularidade por segundo. As figuras 16 e 17 apresentadas a seguir ilustram o comportamento do  $IV_{cc}$  Dinâmico para argônio puro e mistura composta por 80% argônio e 20%  $CO_2$ , variando a vazão do gás de proteção.

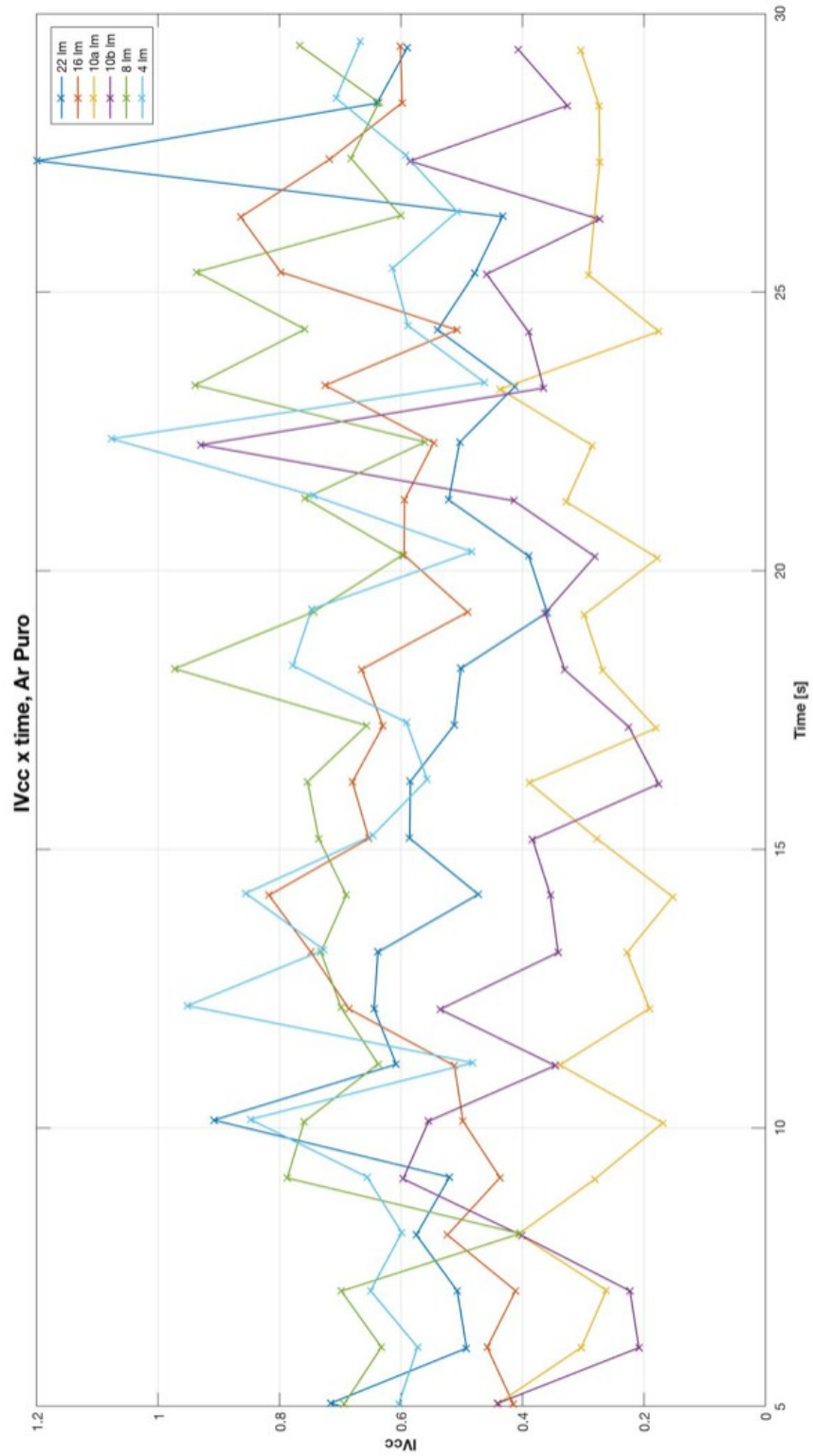


Figura 16: IVcc Dinâmico para Argônio Puro  
Fonte: Do autor

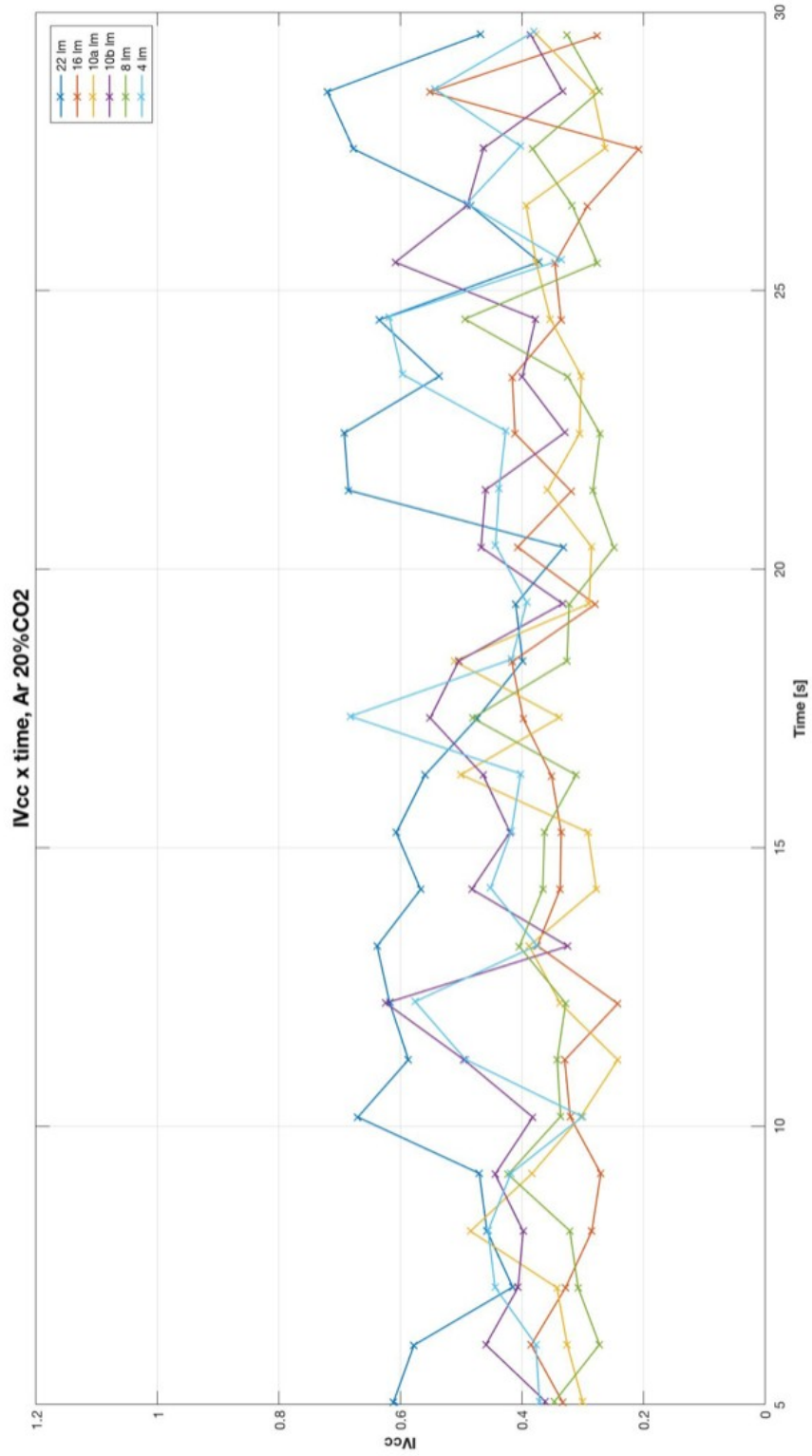


Figura 17: IVcc Dinâmico para 80% Argônio - 20% CO2  
Fonte: Do autor

Pela figura 16, é possível perceber que o nível mais alto de estabilidade ocorreu para ambas as vazões utilizadas de 10 l/min para Ar puro, diferentemente do que se acreditava de que menores valores de  $IV_{cc}$  são encontrados quanto maior a vazão de gás. Em contrapartida, os maiores valores de  $IV_{cc}$ , os quais representam maior instabilidade da transferência metálica, são observados quando a vazão da atmosfera protetora foi regulada para 8 l/min e 4 l/min. Para vazão de gás de 4 l/min, o fluxo torna-se insuficiente para isolar o arco elétrico de elementos nocivos presentes no meio ambiente. Desse modo, a estabilidade do arco e da transferência é influenciada pela ausência de gás no sistema.

Ainda, observam-se picos de variação de  $IV_{cc}$ , atingindo valores superiores a unidade, que prejudicam a regularidade da transferência metálica por curto-circuito. Para a vazão de gás regulada em 22 l/min, nota-se valor de  $IV_{cc}$  igual a 1.2 aos 27 segundos do processo de soldagem. E para a vazão de 4 l/min, valor de  $IV_{cc}$  aproximadamente igual a 1.1 aos 22 segundos de soldagem. A análise feita pelo monitoramento do  $IV_{cc}$  Dinâmico é importante por indicar essas alterações em tempo real que influenciam na qualidade da solda.

Por outro lado, pela figura 17, destaca-se que a mistura composta por 80% Ar e 20%  $CO_2$  apresenta os melhores Índices de Regularidade. Pode-se perceber que a faixa de  $IV_{cc}$  para qualquer vazão de gás regulada na fonte de soldagem apresenta valores entre 0.2 e 0.8, não apresentando nenhuma variação brusca ao longo do processo de soldagem. Entretanto, as maiores oscilações apresentadas pelo gráfico de  $IV_{cc}$  Dinâmico pelo tempo, dificultam a comparação para as diferentes vazões de gás em determinados instantes. Desta forma, visando um melhor entendimento da estabilidade durante o processo de soldagem, utiliza-se de maneira complementar outras duas abordagens para o Índice de Regularidade, apresentadas nos itens 4.3.2 e 4.3.3 a seguir.

#### **4.3.2 $IV_{cc}$ Acumulativo**

Define-se como  $IV_{cc}$  Acumulativo, o Índice de Regularidade calculado pela equação 1 desde o instante zero, no início do processo de soldagem, até o instante  $t$  em que a solda está sendo realizada no momento da medição. Dessa forma, o índice acumulativo é importante no monitoramento de soldagem por avaliar o processo ao longo do tempo, já que os coeficientes de variação são acumulados à medida que o cordão vai sendo produzido. As figuras 18 e 19

apresentadas a seguir ilustram o comportamento do IVcc Acumulativo para argônio puro e mistura composta por 80% argônio e 20% CO<sub>2</sub>, variando a vazão do gás de proteção.



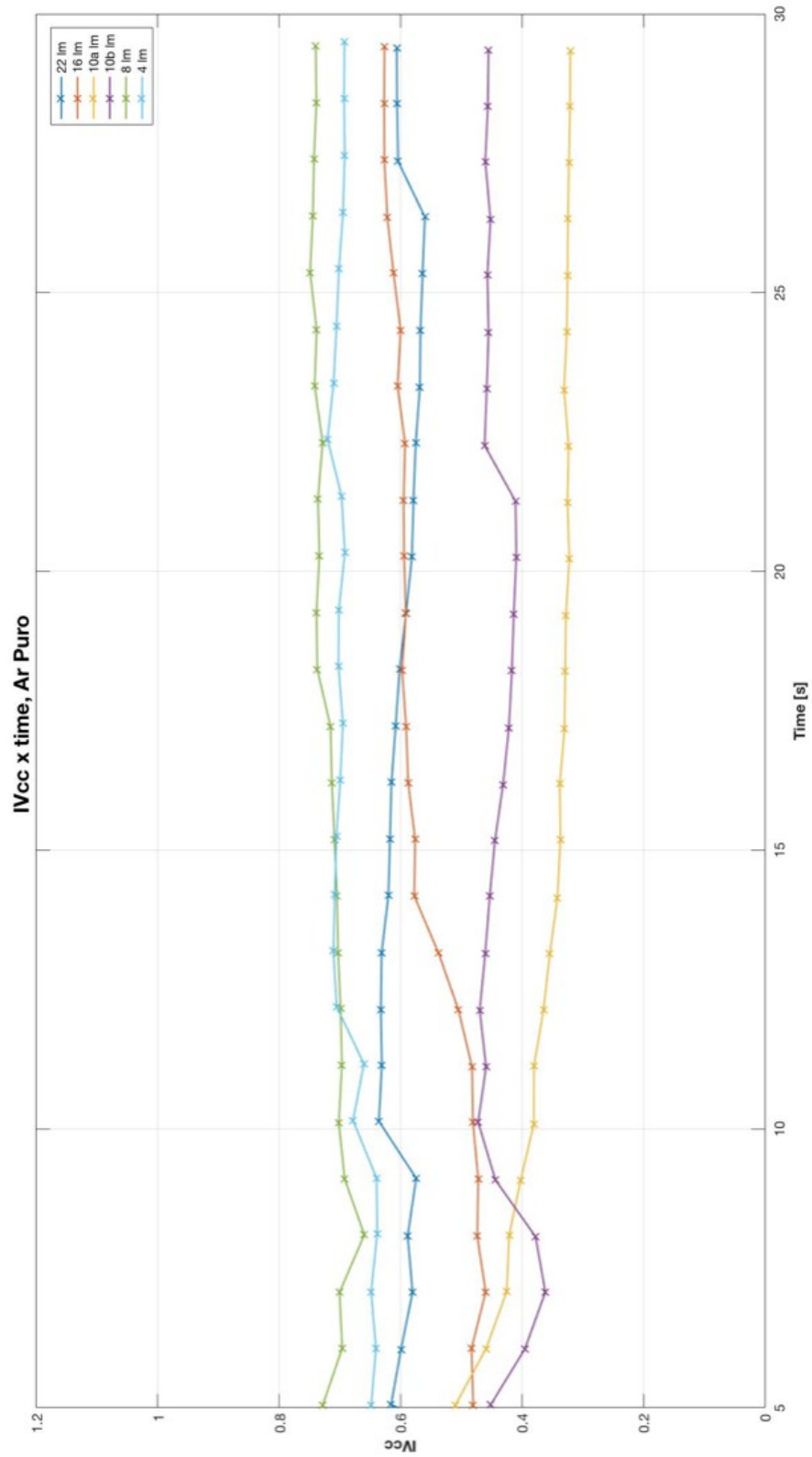


Figura 18: IVcc Acumulativo para Argônio Puro  
Fonte: Do autor

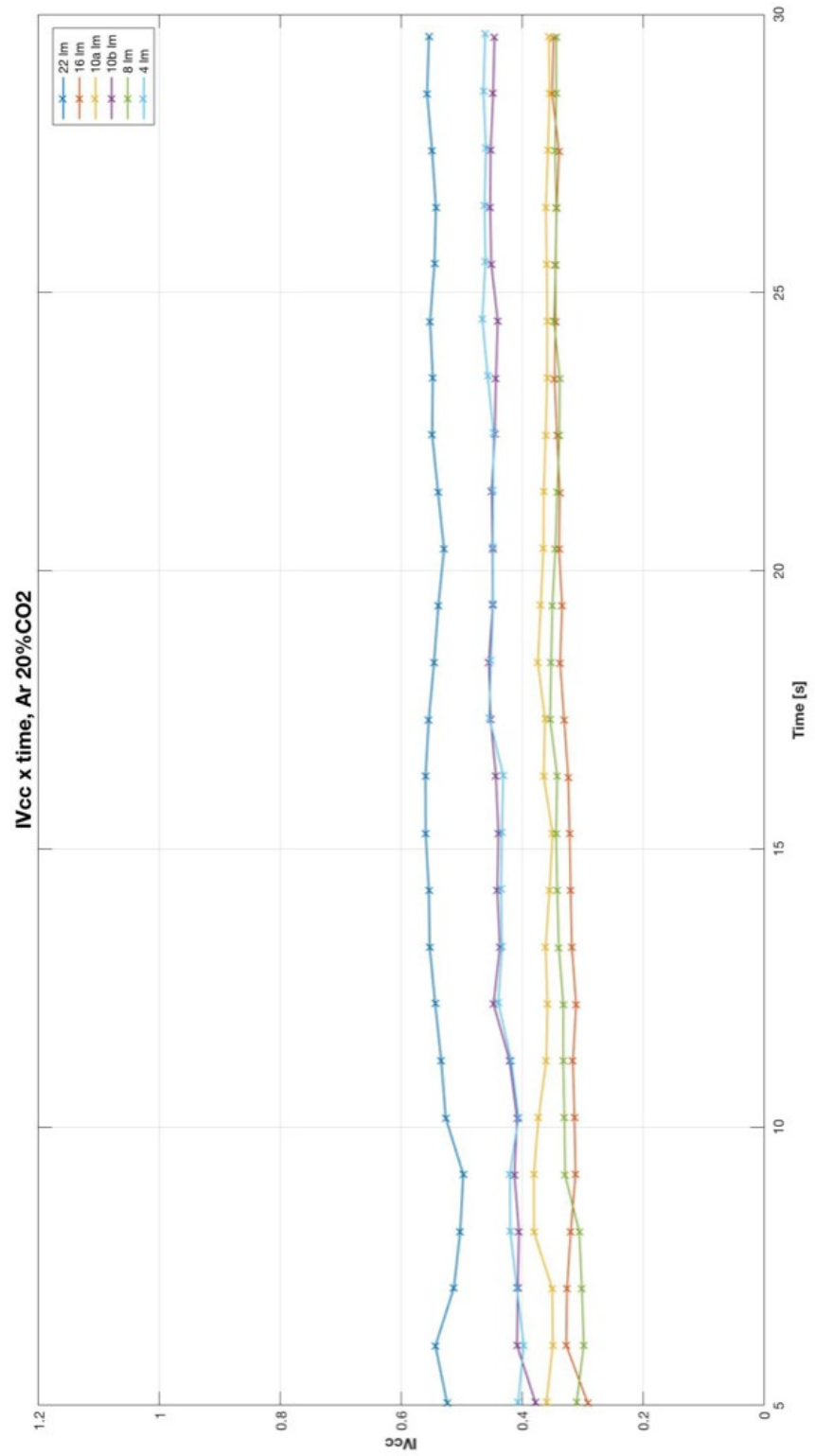


Figura 19: IVcc Acumulativo para 80% Argônio - 20% CO2  
 Fonte: Do autor

Nota-se pelos gráficos de IVcc Acumulativo que os resultados são mais lineares, facilitando a comparação para as diferentes vazões reguladas no processo. Para a mistura composta por 80% Argônio - 20% CO<sub>2</sub>, a análise pelo IVcc Dinâmico era dificultada pelas oscilações presentes. Agora, pela análise do IVcc Acumulativo, fica evidente que os menores valores oscilaram para as soldagens de 8l/min, 10l/min e 16 l/min, como ilustra a figura 19. Esse resultado concorda com o que é exposto na literatura. Segundo Scotti e Ponomarev (2008), o fluxo adequado para atender às condições de soldagem com maior estabilidade varia de 10 a 16 l/min.

Ainda, observa-se maior nível de instabilidade para vazão de gás elevada, 22 l/min. O Índice de Regularidade aumenta devido à turbulência gerada ao utilizar vazões muito altas, que por sua vez diminui a eficiência de proteção e permite a inclusão de elementos contaminantes no arco elétrico, tornando o processo de soldagem menos estável, ineficiente e antieconômico.

Os resultados para Ar puro concordam com o que foi exposto no tópico anterior. Os melhores Índices de regularidade são observados para a vazão de gás de 10 l/min e os piores quando o fluxo foi regulado para 8 l/min e 4 l/min, conforme ilustra a figura 18. Um ponto a se destacar é que a soldagem se manteve constante para praticamente todas as vazões, exceto para a amostra de 16 l/min. Pela análise do gráfico, percebe-se que para o fluxo de 16 l/min, o IVcc Acumulativo cresceu linearmente ao longo do cordão produzido.

### **4.3.3 IVcc Médio**

Uma abordagem auxiliar consiste na apresentação do termo IVcc Médio. O Índice de Regularidade Médio leva em consideração a regularidade da transferência metálica do cordão como um todo, do tempo inicial até o tempo final de soldagem. Isto é, o IVcc Médio é definido como o ponto representado pelo último instante do gráfico do IVcc Acumulativo pelo tempo. A tabela 7 mostra os valores de IVcc Médio para os diferentes fluxos e atmosferas protetoras.

Tabela 7: IVcc Médio

IVcc Médio		
Vazão [l/min]	Argônio puro	80% Ar - 20% CO <sub>2</sub>
4	0,69	0,46
8	0,74	0,34
10	0,32	0,36
10(b)	0,46	0,45
16	0,63	0,35
22	0,61	0,55

A análise comparativa do grau de regularidade entre as atmosferas protetoras indica que a adição de CO<sub>2</sub>, em torno de 20%, ao Ar aumenta a estabilidade do arco. Pela figura 20, é visível a instabilidade, comprovada pelo IVcc Médio, para atmosfera composta por Ar puro quando comparada à mistura.

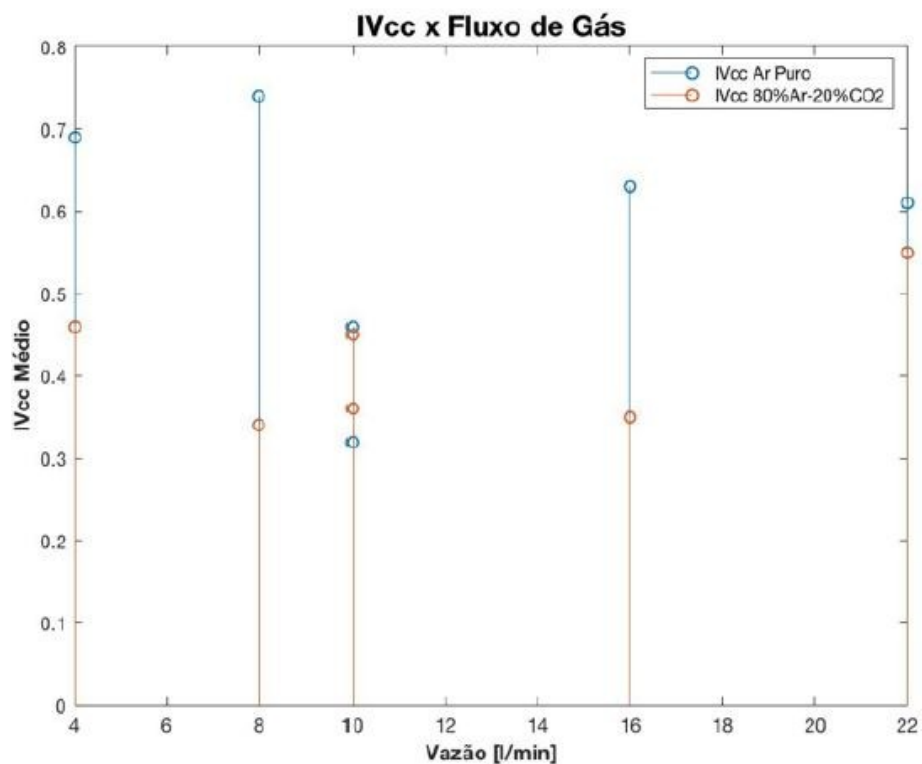


Figura 20: IVcc Médio x Fluxo de Gás  
Fonte: Do autor

Segundo a literatura corrente, o dióxido de carbono, normalmente, é adicionado às misturas de argônio para melhorar a estabilidade, a penetração e as características de fluxo da poça de soldagem (ASM HANDBOOK, 1993). Scotti e Ponomarev (2008) complementam que a adição de CO<sub>2</sub> beneficia a ação da tensão superficial, majorando a energia de soldagem e melhorando o desempenho do gás em soldagem por curto-circuito. Porém, Stenbacka e Person (1989) citados por Liskevych (2010) demonstram que mais de 15% de CO<sub>2</sub> no gás de proteção desestabiliza a transferência metálica e aumenta a quantidade de respingos. Um adendo é feito por Liskevych (2010) em seus estudos, a autora constata que a mistura composta por 80% Ar - 20% CO<sub>2</sub> é a mais utilizada comercialmente nos processos de soldagem por apresentar limites aceitáveis de estabilidade do processo e geração de respingos, assim como resulta em parâmetros geométricos adequados no cordão de solda.

#### 4.4 CURTOS-CIRCUITOS INCIPIENTES

Posteriormente, a análise da influência da atmosfera protetora na ocorrência de curtos incipientes é realizada, mantendo o fluxo de gás regulado em 16 l/min. Monitoram-se os Índices de Regularidade Dinâmicos a cada 1 segundo para cada gás de proteção. Nesse caso, a atmosfera coberta por CO<sub>2</sub> puro também é avaliada no estudo. As figuras 21, 22 e 23 a seguir ilustram a defasagem do comportamento do IVcc com todos os curtos-circuitos e filtrando os incipientes para as diferentes atmosferas protetoras.

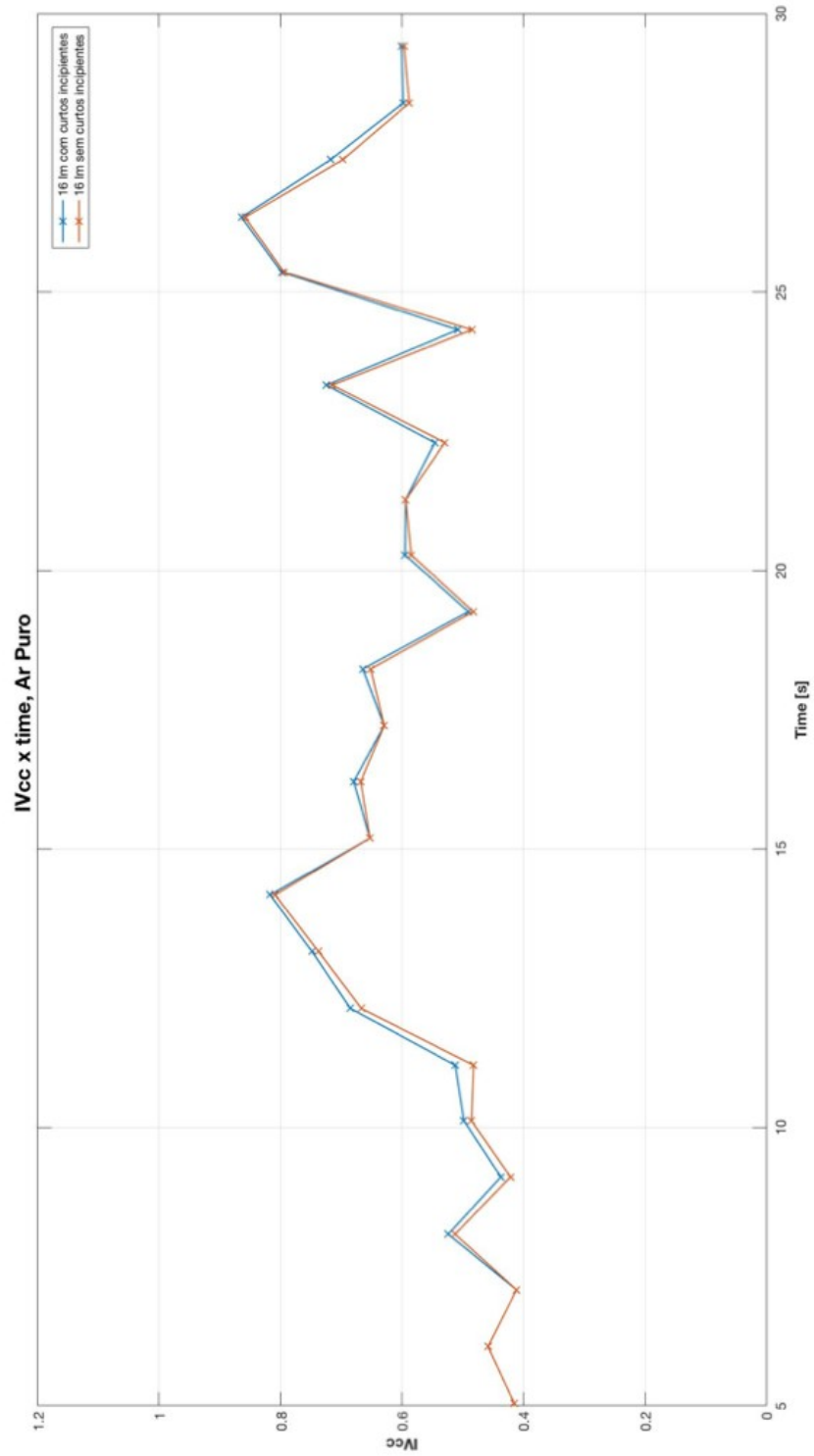


Figura 21: IVcc Dinâmico para Argônio Puro com e sem curtos incipientes  
Fonte: Do autor

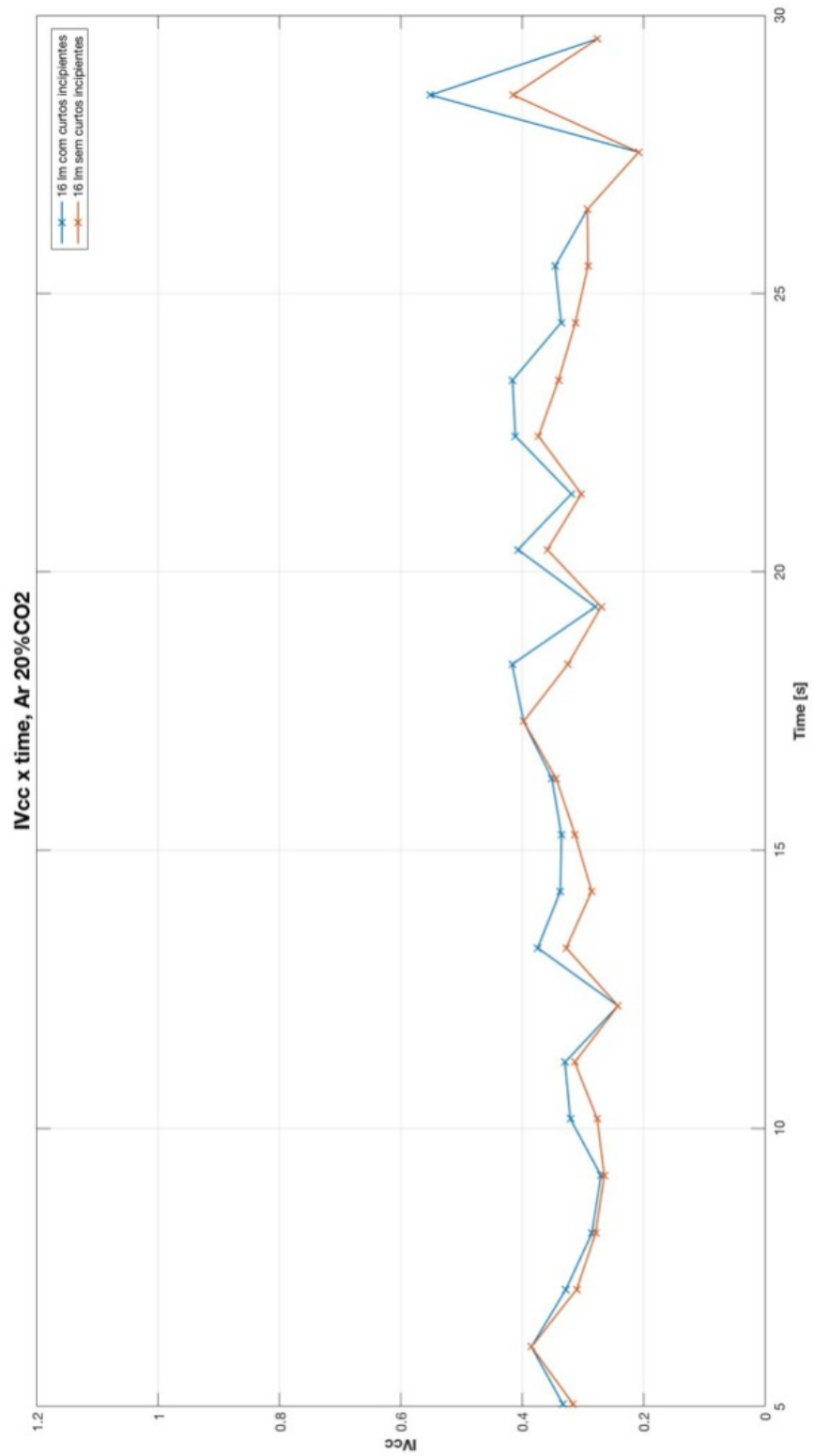


Figura 22: IVcc Dinâmico para 80% Argônio - 20% CO2 com e sem curtos incipientes  
 Fonte: Do autor

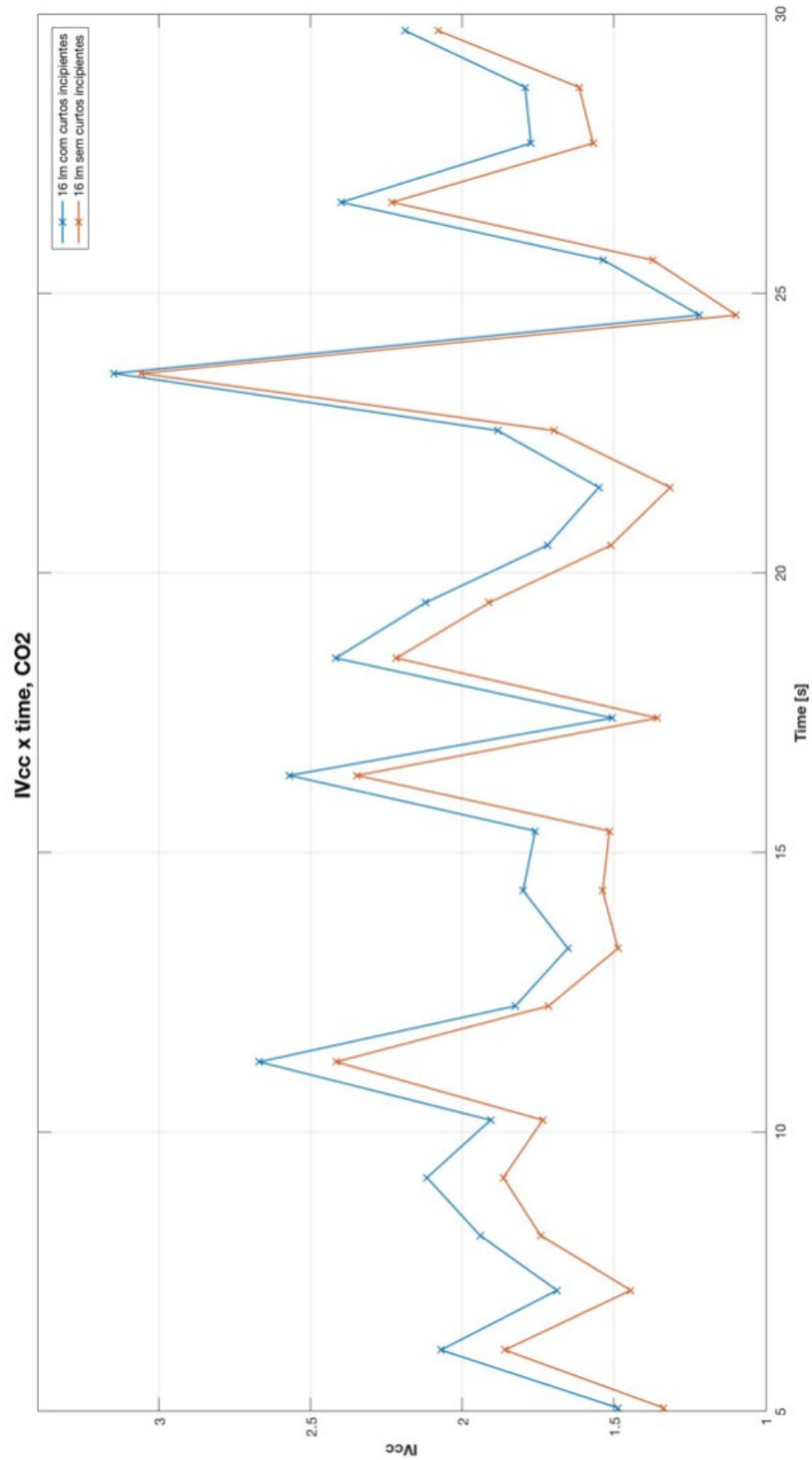


Figura 23: IVcc Dinâmico para CO2 puro com e sem curtos incipientes  
Fonte: Do autor



De acordo com a equação 1, a estabilidade do processo de transferência por curto-circuito está ligada com a constância dos tempos em curto-circuito e em arco aberto. Ao retirarem-se os curtos incipientes, pode-se perceber que o primeiro termo da equação relativo ao coeficiente de variação de tempo de arco aberto não se modifica enquanto o segundo termo referente ao coeficiente de variação de curto-circuito diminui. Isso acontece porque os curtos incipientes apresentam valores muito pequenos, próximos a zero. Filtrando esses valores, a média da amostra cresce e, por conseguinte, o denominador do coeficiente de variação de curto-circuito aumenta. Simultaneamente, o numerador diminui seu valor, já que os pontos dos dados coletados tendem a aproximar da média, diminuindo o desvio padrão. Destarte, melhora-se o nível da estabilidade da transferência metálica.

Os valores de  $IV_{cc}$  são influenciados pela quantidade de curtos incipientes. Quanto maior a ocorrência de curtos incipientes filtrados, menor o coeficiente de variação de curto-circuito e, conseqüentemente, um valor menor de  $IV_{cc}$  é observado.

Nota-se que a parcela de curtos incipientes ocorre em maior número ao se adicionar  $CO_2$  na amostra. Isso se explica pelo fato que, devido à necessidade de se dissociar antes do fenômeno químico de ionização e por ter maior capacidade de troca de calor se comparado a Ar puro, as misturas com maiores quantidade de  $CO_2$  demandam uma maior energia, conseqüentemente, maior tensão para abertura e manutenção do arco (LISKEVYCH, 2010). Como a tensão nos experimentos foi mantida constante, a energia não foi suficiente para estabilizar o arco para atmosfera coberta por  $CO_2$  puro, provocando a incidência de curtos incipientes que repelem a gota da ponta do eletrodo quando essa toca a poça de soldagem. Assim, o curto-circuito não é acompanhado pela transferência metálica propriamente dita.

Os parâmetros regulados no processo de soldagem não foram propícios para uma boa qualidade do cordão de solda quando o  $CO_2$  puro foi utilizado como gás de proteção. Pela figura 23, pode-se verificar que os valores de  $IV_{cc}$  para essa atmosfera protetora apresentam um grau elevado de instabilidade durante todo o processo de soldagem, apresentando valores de  $IV_{cc}$  sempre maiores que 1.

## 5. CONCLUSÃO

### 5.1 CONCLUSÕES

É proposto neste trabalho um algoritmo para cálculo da frequência média de curto-circuito no processo de soldagem GMAW. O código do algoritmo se mostrou bem apropriado para determinar a faixa admissível de tamanho de gota nesse modo de transferência metálica, podendo ser facilmente implementado em um equipamento portátil.

Constata-se que as três diferentes interpretações do Índice Vilarinho de Regularidade são primordiais para um futuro projeto de monitoramento real da qualidade do cordão de solda. O IVcc Dinâmico, o IVcc Acumulativo e o IVcc Médio atuam de forma complementar e eficiente em quantificar a regularidade da transferência metálica por curto-circuito.

Os curtos-circuitos incipientes influenciaram a estabilidade do processo e consequentemente o cálculo do IVcc. A transferência metálica torna-se mais regular quanto menor a quantidade de curtos incipientes. Conclui-se que o aumento de teor de CO<sub>2</sub> no gás de proteção eleva a ocorrência de curtos-circuitos incipientes.

Finalmente, os resultados mostraram que a adição de 20% de CO<sub>2</sub> em Argônio revelou ser a atmosfera protetora mais estável no processo de soldagem GMAW por curto-circuito.

### 5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de testes de hipóteses nos valores obtidos de IVcc Dinâmico para caracterizar a significância estatística dos dados coletados. Além disso, pode-se indicar a aplicação do algoritmo proposto em um microcontrolador como próximo passo para o projeto do monitor sem fio que avalia a estabilidade da transferência metálica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM HANDBOOK. **Welding, Brazing and Soldering**. ASM International, 1993.

CARVALHO, M. V. G. de. **Estudo da estabilidade do arco GMAW-CC através do critério Laprosolda**. 2016. 47 f. TCC (Graduação) - Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

COSTA, T. F. et al. **Correlação entre o Aspecto Superficial do Cordão e a Regularidade da Transferência Metálica por Curto-Circuito para a Soldagem MIG/MAG de Aços Inoxidáveis Austenítico e Duplex**. In: XL Congresso Nacional de Soldagem, 2014, São Paulo. Anais do XL Congresso Nacional de Soldagem. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 2014.

DUTRA, J. C. et al. **Instrumentação para Estudo da Transferência Metálica em Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito**. In: XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, 1995, Caxias do Sul/RS. Anais do XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 1995. p. 867-888.

FERNANDES, D. B. et al. **Ensaio para Medição de Nível e Alcance de Respingos em Soldagem MIG/MAG**. Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 150-155, abr./jun. 2010.

FILHO, D. F.; BÁLSAMO, P. S. de S.; FERRARESI, V. A. **Influência do Tipo de Gás de Proteção da Soldagem MIG/MAG na Qualidade do Cordão de Aço Inoxidável**. 2007.

HERMANS, M. J. M.; DEN OUDEN, G. Process Behavior and Stability in Short Circuit Gas Metal Arc Welding. **Welding Journal**. Welding Research Supplement, v. 78, n. 4, p. 137-141, abr. 1999.

LISKEVYCH, O. **Estudo da Influência do Teor de CO<sub>2</sub> na Regularidade da Transferência de Metal e Estabilidade do processo MIG/MAG**. 2010. 101f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.  
MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

MENDES, R. A. R. **Proposta de um algoritmo para monitoramento de soldagem GMAW CC utilizando o IVcc**. 2016. 56 f. TCC (Graduação) - Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

MENDONÇA, T. R. F. de. **Filtro Hanning Modificado com Tamanho de Janela Variável para Estimação de Amplitude do Sinal da Rede Elétrica**. 2015. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2015.  
OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1982.

REZENDE, G. M. et al. **Um Critério para Determinar a Regulagem da Tensão em Soldagem MIG/MAG por Curto-Circuito.** Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 16, n. 2, p. 98-103, abr./jun. 2011.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho.** São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2008.

SOUZA, D. et al. **Influência da Regulagem de Parâmetros de Soldagem sobre a Estabilidade do Processo MIG/MAG Operando em Curto-Circuito.** Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 22-32, jan./mar. 2011.

SOUZA, D. et al. **Influência da Tensão de Soldagem e do Gás de Proteção sobre a Correlação entre Indutância e Regularidade da Transferência Metálica na Soldagem 45 MIG/MAG por Curto-Circuito.** Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 16, n. 2, p. 114-122, abr./jun. 2011.

## ANEXO 1 – TERMO DE AUTENTICIDADE



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA

### Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral<sup>1</sup> e criminais previstas no Código Penal<sup>2</sup>, além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 20\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_  
NOME LEGÍVEL DO ALUNO (A)

\_\_\_\_\_  
Matrícula

\_\_\_\_\_  
ASSINATURA

\_\_\_\_\_  
CPF

<sup>1</sup> LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

<sup>2</sup> Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena - detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.