

Hellinton Direne Filho

**MIG/MAG CCC - AVANÇOS NA TECNOLOGIA DE CONTROLE  
DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA COMO SOLUÇÃO PARA O  
PASSE DE RAIZ**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jair Calos Dutra

Co-orientador: Dr. Eng. Régis Henrique Gonçalves e Silva

Florianópolis  
2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Direne Filho, Hellinton  
MIG/MAG CCC - AVANÇOS NA TECNOLOGIA DE CONTROLE DA  
TRANSFERÊNCIA METÁLICA COMO SOLUÇÃO PARA O PASSE DE RAIZ /  
Hellinton Direne Filho ; orientador, Jair Carlos Dutra ;  
coorientador, Régis Henrique Gonçalves e Silva. -  
Florianópolis, SC, 2014.  
107 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Soldagem GMAW. 3. Redução de  
Respingos. 4. Programa Sinérgico. 5. Passe de Raiz. I.  
Dutra, Jair Carlos. II. Gonçalves e Silva, Régis Henrique .  
III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Hellinton Direne Filho

**MIG/MAG CCC - AVANÇOS NA TECNOLOGIA DE CONTROLE  
DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA COMO SOLUÇÃO PARA O  
PASSE DE RAIZ**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 11 de Abril de 2014.

---

Professor Jair Carlos Dutra, Dr. Eng. – Orientador

---

Dr. Eng. Régis Henrique Gonçalves e Silva, - Co-orientador

---

Professor Armando Albertazzi Gonçalves Junior, Dr. Eng. - Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Professor Américo Scotti, PhD - Universidade Federal de Uberlândia

---

Dr. Eng. Carlos Eduardo Iconomos Baixo - Universidade Federal de Santa Catarina

---

Dr. Eng. Raul Gohr Junior - Universidade Federal de Santa Catarina



Dedico este trabalho a minha família:  
em especial a meu pai, minha mãe, e  
meu irmão e a Emanuelle, meu amor.



## AGRADECIMENTOS

São sinceros meus agradecimentos à(os):

- Professor Jair Carlos Dutra, pela oportunidade de realização deste trabalho e pelos ensinamentos transmitidos;
- Regis Henrique Gonçalves e Silva, pela co-orientação e atenção dada a este trabalho;
- Raul Gohr Junior: pelas dúvidas solucionadas e suporte nos desenvolvimentos;
- Cleber Guedes: pela ajuda com os ensaios e conhecimentos transmitidos;
- Demais Membros do LABSOLDA, que diretamente ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho: Alexandre Blum Weingartner; Alberto Bonamigo Viviani; Bruna Martinello Savi; Cleber Marques; Daniel Wallerstein; Diego Costa Correia Silva, Diego Erdmann dos Santos, Eduardo Bidese Puhl, Erick Gonzalez Olivares, Everton Werlang, Ezequiel Gonçalves, Felipe Kalil Mendonça, Fernando Costenaro, Guilherme de Santana Weizenmann Ivan Olszanski Pigozzo, Jônathas Alexandre Alves, João Facco de Andrade, Luiz Fernando Suliman, Marcelo Pompermaier Okuyama, Márcia Paula Thiel, Mateus Barancelli Schwerdersky, Marcus Baretche, Rafael Polezi Lucas, Miguel Guayasamin, Paulo Roberto Pereira, Rafael Polezi Lucas, Ramon Natal Meller, Reinaldo Fayal, Renan Kindermann, Ricardo Campagnin, Rodrigo da Silva Machado;
- Professores: Armando Albertazzi, Augusto Buschinelli, Carlos Augusto de Oliveira; Carlos Niño, Cleide Marqueze, Orestes Alarcon;
- Meus amigos: Alcides Netto, Diego Taguai, José Sanchez, Juliano Teixeira, Marcelo Espiga, Paulo Cortez, Victor Pigozzo, Victor Pontes;
- Minha Família;
- Universidade Federal de Santa Catarina e ao Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica;



“Um passo à frente e você não  
está mais no mesmo lugar.”

Chico Science, 1996



## RESUMO

Nas indústrias de petróleo e gás e de construção naval, a união entre componentes metálicos, caracterizada por grandes espessuras e soldagem multipasse, é, em sua maioria, executada de forma manual por soldadores previamente qualificados. Desta forma, a qualidade da solda está intimamente ligada à habilidade do soldador em adequar as condições do arco voltaico e da transferência metálica à junta que está sendo soldada. A obtenção de soldas com mínima formação de defeitos é principalmente agravada na soldagem do passe de raiz. Nesta situação é necessário um meticuloso controle da poça de fusão a fim de obter a penetração desejada, sem promover o escorrimento da poça, fenômeno conhecido como *burn-through*. Outro agravante está na preparação da junta a ser soldada, que nem sempre oferece dimensões repetitivas, apresentando irregularidades como *gaps* e ângulos variáveis, *high-low*, entre outras variações nas dimensões da junta. A influência destes defeitos sobre o passe de raiz é minimizada ao se garantir um maior controle da energia aportada à peça, proposição das tecnologias de controle da transferência por curto-circuito. Contudo, atualmente, a maioria do suprimento desta tecnologia advém de empresas de fontes de soldagem situadas no exterior. Além da escassez de informações sobre as várias soluções disponibilizadas por diferentes fabricantes, ainda, se está restrito a soluções para aplicações pré-definidas de fábrica. Dentro deste cenário é que se insere o presente trabalho. Ele aprimora uma tecnologia nacional, denominada de CCC (Curto-Circuito Controlado), com início de desenvolvimento em 1999. O objetivo é a criação de uma base sólida para o desenvolvimento e consolidação deste tipo de tecnologia em território nacional. Isto assegura melhor *feedback* com efetiva adaptação contínua. Por intermédio de implementações de *software* e *hardware* na fonte de soldagem, foi atingido um controle de alta dinâmica na forma de onda de corrente, na faixa dos microssegundos, além de melhorias nas rotinas de realimentação e controle das variáveis elétricas do processo. Cada fase da transferência metálica por curto-circuito foi avaliada em ensaios práticos de soldagem, resultando em maior precisão no controle da transferência das gotas e na dinâmica da poça de fusão. Foram desenvolvidos programas sinérgicos para os arames ER70S-6 de 1,0 e 1,2 mm de diâmetro, utilizando como gás de proteção uma composição de 75% de argônio e 25% de CO<sub>2</sub>. Procurando aumentar a facilidade de utilização do processo por parte do soldador, definiram-se apenas duas variáveis de regulagem para o processo CCC, a velocidade de alimentação de arame, entre 2 e 6 m/min, e o parâmetro “a”, responsável por regulagens finas na potência. Os testes foram monitorados com auxílio de câmera de alta velocidade e sistemas de aquisições de dados.

Com a utilização destas ferramentas de avaliação foi possível obter explicações concisas sobre a influência de cada fase da forma de onda de corrente na dinâmica da transferência metálica e da poça de fusão. Como resultado dos desenvolvimentos realizados neste trabalho, atualmente o processo de soldagem CCC apresenta alta regularidade na transferência metálica, baixa formação de respingos e adequado controle da poça de fusão, além de oferecer programas sinérgicos.

**Palavras-chave:** Soldagem GMAW. Curto Circuito-controlado. Redução de Respingos. Programa Sinérgico. Passe de Raiz.

## ABSTRACT

In the oil and gas and shipbuilding industries, the welds between metal components are characterized by large thicknesses and multipass welding. This job is mostly performed manually by previously trained welders. Thus, the weld quality is closely linked to the ability of the welder to adjust the conditions of the arc and the metal transfer mode to the joint. Achieving healthy welds is particularly aggravated in the root pass welding. In this situation is necessary a meticulous control of weld pool in order to obtain the desired penetration without causing burn-through. Another problem is in the joint preparation, it does not always provide exact dimensions, presenting irregularities such as inconstant gaps and angles, high-low and other dimensions variations. The technologies that propose the controlled short circuit technology minimize the influence of these defects on the root pass with greater control of heat input. However, currently, most of the supply of this technology is in the international power sources, and the high-tech products stay in these regions and local industry just uses this technology. To create a solid foundation and develop this technology in Brazil, providing greater feedback with effective continuous adaptation, evolution and a potential success in the application of the process to the local industry, was planned out the main objective of this work, that is the improvement of the welding process CCC (Controlled short circuit), seeking to optimize its current waveform and the formulation of a synergistic program. Through software and hardware implementations and improvements in routines and feedback control of electrical process variables, the welding source is working in a high dynamic control of the current waveform, at a microsecond range. In experimental welding tests each phase of short circuit transfer was evaluated, resulting in greater precision in controlling the transfer of droplets and weld pool dynamics. Based on these results, were developed synergistic programs to mild steel consumables 1.0 to 1.2 mm in diameter, using protective gas as a composition of 75% argon and 25% CO<sub>2</sub>. Seeking facilitate the use of the process by the welder, were set up just two variables for adjusting the CCC process, the wire feed speed, between 2 and 6 m / min, and the "a" parameter responsible for fine adjustments in output power. The tests were monitored with high-speed camera and data acquisition systems. The use of these assessment tools enabled to obtain concise explanations of the influence of each phase of the current waveform and of metal transfer and weld pool dynamics. As a result this work, currently, the CCC welding process has high regularity of metal transfer, low spatter and good weld pool control, and provides synergistic programs.

**Key-Words:** GMAW Welding. Controlled Short Circuit Transfer. Spatters Reduction. Synergic Program. Root Pass.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema da transferência metálica por curto-circuito convencional, acompanhada pelos oscilogramas de corrente e tensão versus tempo. ....	30
Figura 2.2. Tensão superficial para diferentes temperaturas. Fonte: [6] .....	32
Figura 2.3. Tensão superficial para diferentes concentrações de enxofre. Fonte: [15].....	33
Figura 2.4. Caracterização das linhas de corrente passando do interior da gota para o arco plasma. a) Contribuindo para o destacamento. b) Desfavorecendo o destacamento. As linhas menores e mais grossas correspondem a componente axial da força eletromagnética. Adaptada de [12]. ....	36
Figura 3.1. Tempos de operação dos fenômenos de soldagem e a velocidade de controle das fontes de soldagem. Fonte: Adaptada de [27] .....	43
Figura 4.1. (a) Oscilograma para três níveis de corrente. (b) Oscilograma para dois níveis de corrente. Fonte: [6] .....	46
Figura 4.2. (a) Dispositivo eletrônico para controle de corrente. (b) Forma de onda da corrente evidenciando a reignição do arco. Fonte: [7].....	48
Figura 4.3. (a) Diversos comportamentos da Resistência do circuito de soldagem. (b) Relacionamento $U_{cc} \times A$ e $U_{cc} \times ms$ . Fonte: [7] .....	49
Figura 4.4. Forma de onda de corrente do Processo CCC desenvolvida por Silva. Fonte: Adaptada de [8] .....	50
Figura 5.1. Captura do vídeo de alta velocidade da transferência por curto-circuito sincronizada com a aquisição de sinal. ....	54
Figura 5.2. Representação da forma de onda de corrente para o Processo A. Fonte: Adaptada de [35].....	55
Figura 5.3. Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem para o Processo A obtidos via osciloscópio. Programa ROOT, va 3,4 m/min, TRIM 1, PEAK OFF, metal de adição ER70S-6 de 1,2 mm de espessura, gás Argônio puro.....	56
Figura 5.4. Oscilogramas para diferentes programas sinérgicos do Processo A para material de aço carbono, espessura de 1,2 mm e velocidade de alimentação de arame de 3,4 m/min. a) Programa 126 com <i>tail-out</i> . b) Programa 119 ROOT. ....	57
Figura 5.5. Valores médios e eficazes para as variáveis elétricas do Processo A. a) Corrente de soldagem; b) Tensão de soldagem; c) Velocidade de alimentação de arame.....	58
Figura 5.6. Oscilogramas de Corrente e Tensão para 25, 20, 15 e 10 mm de DBCP, para um tempo de 0,6 ms. As curvas destacadas correspondem	

ao período de regime para cada DBCP, 10 segundos depois da alteração da DBCP.....	58
Figura 5.7. Imagem da gota fundida na eminência do toque na poça de fusão. a) DBCP 10 mm; b) DBCP 25 mm. ....	59
Figura 5.8. Variação da corrente de soldagem eficaz ( $I_{ef}$ ) pela velocidade de alimentação de arame ( $v_a$ ). Processo A (vermelho); Processo Convencional (azul).....	61
Figura 5.9. Avaliação de potência para diferentes velocidades de alimentação. (vermelho) Processo A; (azul) Convencional.....	61
Figura 5.10. Imagem da seção transversal para os processos de soldagem na realização do passe de raiz. a) Processo A; b) Processo Convencional. Fonte: [39] .....	62
Figura 5.11. Fases do Processo B. Fonte: Adaptado de [42] .....	63
Figura 5.12. Oscilogramas para corrente e tensão de soldagem e velocidade de alimentação de arame variando o parâmetro do <i>Arc Control</i> .....	64
Figura 5.13. Alteração da forma de onda da corrente como consequência da variação do <i>Arc Control</i> . O círculo verde pontilhado evidencia o momento que se caracteriza o curto-circuito. ....	65
Figura 5.15. Dados de corrente (amarelo) e tensão (azul) de soldagem para o Processo B obtidos com o auxílio de um osciloscópio evidenciando o período de curto-circuito. O círculo vermelho pontilhado evidencia o momento que se caracteriza o curto-circuito. ....	67
Figura 5.16. Dados de corrente (amarelo) e tensão (azul) de soldagem para o Processo B obtidos com o auxílio de um osciloscópio evidenciando a reabertura e o pulso de corrente. ....	68
Figura 6.1. Fluxograma do controle da forma de onda de corrente para o processo CCC. ....	69
Figura 6.2. Representação da forma de onda de corrente e tensão de soldagem para o processo CCC. ( $T_{cc}$ ) período de curto-circuito. ( $T_a$ ) período de arco. ....	70
Figura 6.3. Depósitos sobre chapa realizados com o processo CCC para diferentes correntes de base. a) $I_b=70$ A; b) $I_b=50$ A; c) $I_b=30$ A; d) $I_b=10$ A; $v_a=3,5$ m/min; eletrodo ER70S-6 de bitola 1,2mm; Gás de proteção C25.....	71
Figura 6.4. Formação da ponte metálica. Taxa de Aquisição: 4166 fps. ....	72
Figura 6.5. Estriccionamento da ponte metálica. a) 50 A/ms; b) 200 A/ms; diâmetro do eletrodo: 1,2 mm. ← Direção de soldagem. Taxa de Aquisição: 4166 fps. ....	73
Figura 6.6. Imagens seguintes da sequência da Figura 6.4: a) 50 A/ms; b) 200 A/ms; diâmetro do eletrodo: 1,2 mm. ← Direção de soldagem.....	74

Figura 6.7. Oscilogramas de tensão de soldagem evidenciando o número de acertos na reabertura. Em azul para 70 A/ms; Em vermelho 100 A/ms. O acerto da reabertura é evidenciado pelos círculos pontilhados. ....	75
Figura 6.8. Comparação entre tamanho de gotas logo após o pulso de corrente. a) tempo de pulso 1,3 s; b) tempo de pulso 1,8 s. ....	76
Figura 6.9. Módulo de potência para o fornecimento da corrente principal do processo CCC.....	79
Figura 6.10. Representação do comportamento da corrente de soldagem para uma fonte chaveada. (ta) tempo de chave aberta; (tb) tempo de chave fechada.....	79
Figura 6.11. Primeira estrutura para o módulo de redução de respingos (MRR).....	81
Figura 6.12. Módulo de potência para o processo CCC completo. ....	82
Figura 6.13. Módulo de Potência com fonte auxiliar. ....	83
Figura 6.14. Leitura com osciloscópio da tensão real (azul) e da tensão de realimentação (amarelo).....	84
Figura 6.15. Oscilograma de corrente (roxo) e tensão (azul) de soldagem lidas pelo osciloscópio. Com círculo pontilhado evidenciando o tempo de detecção de reabertura. ....	86
Figura 6.17. Representação da lógica da detecção da iminência do rompimento da ponte metálica. ....	89
Figura 6.18. Comparação entre o processo MIG/MAG convencional (a) e o processo CCC (b), relativa à formação de respingos. ....	90
Figura 7.1. <i>Display</i> da fonte de soldagem para o processo CCC antes da formulação do programa sinérgico.....	91
Figura 7.2. <i>Display</i> da fonte de soldagem para o processo CCC sinérgico.	92
Figura 7.3. Forma de onda de corrente e tensão de soldagem para uma velocidade de alimentação de 3,5m/min. ....	93
Figura 7.4. Distúrbios na corrente de soldagem para velocidades de alimentação superiores a 6 m/min. (va) 6,5 m/min; material de adição ER70S-6 de bitola 1,2 mm; gás de proteção C25. ....	94



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Valores calculados para volume, período de vibração e tensão superficial. Adaptada de [20] .....	34
Tabela 3.1. Categorias de transferência por curto circuito controlado e seus recursos. Fonte: Adaptada de [26] .....	41
Tabela 4.1. Pacote de Arquivos DIGI. Fonte: [8] .....	51
Tabela 6.1. Dados obtidos para o processo A .....	60
Tabela 6.2. Dados obtidos para o processo Convencional .....	60
Tabela 5.3. Valores médios e eficazes para alterações no <i>Arc Control</i> .....	63



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C25 - Mistura dos gases argônio (75%) e CO<sub>2</sub> (25%)  
CCC - Curto-circuito controlado  
CCC SIN - Programa da fonte para o sinérgico do CCC  
CH1 - Chave 1  
CH2 - Chave 2  
CH3 - Chave 3  
CMT - *Cold Metal Transfer*  
Cn - Ciclos de aquecimento  
D1-Diodo de roda-livre 1  
D2 - Diodo2  
D3 - Diodo3  
DBCP - Distância do bico de contato para a peça de soldagem  
DIGI - Dados oscilográficos e estatísticos sobre a solda realizada  
ER - Eletrodo revestido  
G - Pressão Pinch  
Ib- Corrente de base  
Icc-Corrente de pico de curto-circuito  
Ief-Corrente eficaz  
If-Corrente no fim do curto-circuito  
I<sub>g</sub>- Corrente de assentamento de gota  
IGBT-*Insulated Gate Bipolar Transistor*  
I<sub>p</sub>- Corrente de pulso  
I<sub>pm</sub>- Corrente de patamar intermediário  
I<sub>rr</sub>- Corrente de redução de respingos  
I<sub>s</sub>- Corrente média entre os valores máximos e mínimos do ripple  
K<sub>rab</sub>- Fator de referência da resistência  
L1 -Indutor 1  
L2 - Indutor 2  
L<sub>c</sub>- Indutância dos cabos  
MIG/MAG-*Metal inert gas/ metal active gas*  
MP - Módulo de proteção  
MRR - Módulo de redução de respingos  
MTS-*Metal Transfer Stabilization*  
PEAK - Regulagem fina de corrente para a fonte 455M/STT  
Pot - Potência  
r1- Rampa 1  
R1 - Resistência 1  
r2- Rampa 2  
Ri - Resistência de referência

RMD - *Regulated Metal Deposition*  
SAP - Sistema de aquisição portátil  
STT – *Surface Tension Transfer*  
STT ROOT - Programa da fonte 455M/STT para soldagem de passe de raiz  
T - Período total de transferência  
Ta - Tempo de arco  
ta - Tempo de chave aberta  
tb - Tempo de chave fechada  
tcc - Tempo de curto-circuito  
TIG – *Tungsten Inert Gas*  
TRIM - Regulagem fina de tensão para a fonte 455M/STT  
Trr - Tempo de operação do módulo de redução de respingos  
Ua - Tensão do arco  
Ucc-Tensão de curto-circuito  
UL1 - Tensão do indutor 1  
Ur-Tensão em vazio da fonte de soldagem  
Uri- Tensão de reignição  
V<sup>3</sup>j-1 - Volume de material que restou logo após a transferência  
va - Velocidade de alimentação de arame  
Va - Velocidade de alimentação de arame no *display* da fonte  
Vj - Volume da gota antes do curto-circuito  
Vj-1 - Volume da gota após várias experiências de curto-circuito,  
 $\Delta I$  - *Ripple*  
 $\Delta t$  - Tempo de condução do transistor  
 $\Delta t_{CH2}$  - Tempo de funcionamento do módulo de redução de respingos  
 $\Delta V_j$  - Volume de eletrodo fundido durante o período de arco

## SUMÁRIO

1. Introdução	25
2. Fundamentos da soldagem MIG/MAG em transferência por curto-circuito	29
2.1. Mecanismo de Transferência por Curto-circuito Operando com controle de tensão	29
2.2. Tensão Superficial	31
2.3. Forças Eletromagnéticas	35
2.4. Forma e Volume da Gota Metálica	37
3. Fundamentos da Transferência por Curto-circuito controlada em Corrente	39
3.1. Métodos Modernos de Controle	42
4. Histórico do Processo CCC no LABSOLDA	45
5. Critérios para Avaliações dos Processos com Controle do Curto-circuito	53
5.1. Fabricante A	55
5.2. Fabricante B	62
6. Desenvolvimentos para o Processo CCC	69
6.1. Forma de Onda de Corrente	69
6.2. Fonte de Soldagem	78
6.3. Funcionamento do Módulo de Redução de Respingos (MRR)	83
7. Formulação de Programas Sinérgicos	91
8. Discussões Finais	95
9. Temas para Trabalhos Futuros	97
10. Referências	99
Apêndice A – Oscilogramas de tensão e corrente de soldagem e velocidade de arame para os programas sinérgicos do Processo CCC	104



## 1. INTRODUÇÃO

O rumo do desenvolvimento científico e tecnológico de cada país deveria ser orientado no sentido do estabelecimento de uma política de estratégias adequadamente concatenada com o presente e o futuro. Para o Brasil este rumo poderia muito bem ser definido com base no crescimento da indústria de petróleo e gás natural e da indústria de construção naval. Para a indústria do petróleo e gás natural, é previsto um investimento de 236,7 bilhões de reais entre os anos de 2013 e 2017, o que consagra este segmento como a segunda maior carteira de investimentos entre todas do mundo [1]. A razão pode ser atribuída à descoberta do petróleo abaixo da camada pré-sal, o que possibilitaria o desenvolvimento do país como um todo, preparando a nossa indústria para ser relevante e competitiva mundialmente. Isto seria uma realidade se fosse dada a devida ênfase ao desenvolvimento tecnológico e a expansão da capacidade produtiva em rumo adequado. A indústria naval, singrando nos ventos da indústria petrolífera, teria forte obrigação de estabelecer um rumo mais audacioso de melhora de sua forma de produzir. Somente no estado de Santa Catarina, considerado o estado guardião do extremo sul do pré-sal, há importantes estaleiros em expansão, caso do Keppel Singmarine Brasil, que prevê um investimento de 50 milhões de reais para 2014 [2]. Outro exemplo, dentro do estado de Santa Catarina, está na ampliação da rede dutoviária para gás natural por parte da Companhia de Gás de Santa Catarina (SCGás), esta prevê para 2014 um investimento de mais de 45 milhões de reais e a ampliação de sua rede de gasodutos para um total de 1020 km, abastecendo mais de 59 cidades. De acordo com o atual Plano Plurianual de Negócios 2014-2018 (PPN), a empresa pretende chegar a 2016 com investimentos na ordem de R\$ 591 milhões e 1.495 km de rede [3].

Assim, um adequado rumo para o desenvolvimento científico e tecnológico do país seria investimentos em soluções inovadoras nas áreas de engenharia de materiais, mecânica, robótica, automação, integração de sistemas complexos, entre outros. Isto geraria um grande potencial para aplicação posterior em outros setores, como indústria automotiva, aeronáutica e eletroeletrônica, resultando em importantes vantagens competitivas para aqueles que as desenvolvessem. Entretanto, o rumo ou os rumos não são bem concatenados, pois, não há de fato adequadas gestões nas políticas de ciência e tecnologia. A academia é cada vez mais burocrática e a indústria não possui interlocutores adequados para conversar com ela. A primeira valoriza exacerbadamente os títulos, tornando-se muitas vezes fábrica dos mesmos e a segunda não faz muito esforço em escutar a primeira e experimentar novas formas de produzir.

À parte destas anomalias brasileiras, mas sintonizado com o que deveria realmente ser, o LABSOLDA continua dando seu esforço em busca de geração de tecnologias nacionais dentro do atual estágio da arte. Assim foi com a produção de fontes de energia de soldagem iniciada na década de 1980, intensificada na década de 1990 e que continua nos dias atuais. O trabalho que aqui é descrito se encontra dentro deste contexto, dando reforço às habilidades da moderna linha de equipamento DIGIPLUS da empresa IMC, empresa encubada até o ano de 2006 no LABSOLDA. O foco do trabalho é o aprimoramento da tecnologia para a soldagem de passes de raiz em chapas espessas de aço carbono. Existem várias destas tecnologias com este foco em diferentes países industrializados do mundo e elas competem entre si. O Brasil fica simplesmente à mercê das mesmas, sem ao menos sequer entendê-las a fundo e compará-las. O LABSOLDA então desenvolveu uma tecnologia nacional, que por ser de total domínio, será possível aperfeiçoá-la e ampliá-la.

O trabalho nesta linha de tecnologia de soldagem para o passe de raiz está em adequada sintonia com o grande desafio de campo, que por depender da formação dos soldadores disponíveis em um dado momento, é o que estabelece o processo e a forma de execução. Assim, quem dita as regras do jogo é o soldador, o qual tem elevada rotatividade [4]. O engenheiro da obra torna-se meramente um viajante do tempo. Se o soldador possuir familiaridade com o processo eletrodo revestido, o passe de raiz será realizado com o tipo celulósico, pois este é o que tem sido consagrado ao longo do tempo como o que permite maior robustez independentemente da posição de soldagem. Se o soldador possuir habilidades com o processo TIG, este será o processo a ser utilizado. Portanto, não desempenha qualquer papel a questão de atualidade tecnológica, que tem a ver com a reprodutividade e produtividade. Além disso, não há acúmulo de conhecimento para uma progressão em direção a uma automatização.

Uma alternativa a estes processos, que já tem sido utilizada, é o processo MIG/MAG convencional com transferência por curto-circuito. A vantagem primordial em relação aos anteriormente citados é a produtividade. O processo a eletrodo revestido força a um maior número de paradas para a troca de eletrodos, o que implica também em tarefas de retirada de escoria e esmerilhamento para o reinício com novo eletrodo. O processo TIG implica em que o soldador, em utilizando as suas duas mãos para manipular simultaneamente a tocha e a vareta, confira ao processo uma baixa potência do arco, em consequência uma baixa taxa de fusão da vareta de adição e resultando numa baixa produtividade.

Apesar desta característica de aumentar a produtividade, o processo MIG/MAG convencional com transferência por curto-circuito não oferece robustez suficiente para enfrentar a tradição do eletrodo revestido e do TIG. Utilizando a tensão como variável mestra, a corrente não sendo propriamente regulada, resulta em pouca capacidade auto adaptativa quando a junta sofre variação e a poça de fusão passa por pequenos distúrbios. Entretanto, a automatização é possível, mas a obtenção de um procedimento de soldagem factível não é uma tarefa fácil de ser atingida e fica extremamente dependente da uniformidade da junta.

Para enfrentar esta problemática foram iniciadas desde 1987 [5] pesquisas de controle da transferência metálica a fim de obtenção de uma solda de raiz com maior robustez. A filosofia do processo muda completamente. Ao invés de se ter a tensão como variável mestra, a corrente é o foco do processo e realmente passa a ocorrer um controle na acepção da palavra, monitoração do que está ocorrendo e atuação. Esta monitoração e reação devem agir em tempos muito rápidos.

Em outras partes do mundo cada fabricante apresenta sua própria fórmula e nomenclatura, sendo que a pioneira foi a empresa Lincoln com a marca STT (*Surface Tension Transfer*). Nesta esteira de desenvolvimento surgiram o SpeedPulse da Lorch, ControlWeld da Cloos, MTS (*Metal Transfer Stabilization*) da Industrial Panasonic, FastRoot da Kamppi, ColdArc da EWM, CMT (*Cold Metal Transfer*) da Fronius e RMD (*Regulated Metal Deposition*) da Miller Electric, cada um com suas peculiaridades, porém com os mesmos objetivos, tornar o processo de soldagem MIG/MAG robusto e repetitivo.

A denominação aqui apresentada é CCC (Curto-Circuito Controlado). Este tema vem sendo estudado no LABSOLDA desde o ano de 1999 abordado por Baixo [6] em sua tese de Doutorado, na qual apresentou as minúcias dos fundamentos do processo. Em 2002 na tese de Gohr Jr [7], com o desenvolvimento dos equipamentos. Com a dissertação de Silva [8] em 2005 houve um estudo detalhado e uma aplicação prática, ainda que muito restrita.

A motivação do presente trabalho foi de trazer o processo CCC do estágio experimental e acadêmico para uma situação de utilização industrial. Esta tecnologia faz parte de um conjunto de sistemas de soldagem que empresas de grande porte desenvolvem e que países como o Brasil simplesmente se tornam consumidores sem a possibilidade de um dia ditarem

as regras do jogo comercial. Embora, a inversão de posição entre os países mandantes e os subordinados é muito difícil de ser obtida, cabe a universidade dar a sua contribuição. Assim, foram estabelecidas várias ações para que a tecnologia de soldagem de passes de raiz fosse avançada tecnologicamente e tivesse uma grande facilidade de utilização por meio da elaboração de programas sinérgicos para o processo CCC. Com vista à obtenção destes objetivos, as seguintes etapas foram programadas:

- Pesquisar em literatura técnica e científica, e verificar experimentalmente quais as técnicas de controle que apresentam melhores resultados, para as condições estabelecidas no trabalho, no controle da transferência metálica por curto-circuito;
- Realizar implementações de *software* e *hardware* na fonte de soldagem do processo CCC, buscando o melhor desempenho na realimentação do processo e boa dinâmica de resposta no controle da forma de onda, voltado para uma boa controlabilidade da transferência metálica;
- Estudar cada fase da transferência metálica para definir a forma de onda de corrente para diferentes velocidades de alimentação de arame e aportes de energia;
- Formular programas sinérgicos para arames ER70S-6 de 1,0 e 1,2 mm de espessura, gás de proteção com composição de 75% de argônio e 25% de CO<sub>2</sub>(C25), aplicáveis à união de produtos de aço carbono A36.

## **2. FUNDAMENTOS DA SOLDAGEM MIG/MAG EM TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO**

O processo CCC, objeto do presente trabalho, opera no modo de transferência metálica por curto-circuito, que utiliza baixas intensidades de corrente média. Portanto, as forças eletromagnéticas não têm energia suficiente para expelir uma fundida do eletrodo antes que este toque a peça, toque que caracteriza um curto-circuito. No entanto, neste momento, a tensão superficial maior na poça de fusão atua no sentido de puxar essa parte fundida para o interior, então, pela soma das forças de tensão superficial com as forças de origem eletromagnéticas, além de forças de arraste e outras com menor intensidade, ocorre à transferência do metal fundido. O processo de soldagem CCC, fundamentalmente, é caracterizado por controlar e manter a regularidade deste tipo de transferência, que por esse motivo será exclusivamente estudada.

Para seguir no desenvolvimento do processo de soldagem CCC é necessário compreender alguns dos fenômenos físicos que regem esse tipo de transferência, além de ter um conhecimento prévio da formação e manutenção do arco elétrico, das propriedades elétricas e físicas das fontes de energia e das propriedades dos gases de proteção relacionados, as propriedades térmicas e dinâmicas dos metais líquidos apresentam-se como de vital importância para o desenvolvimento deste trabalho, que, portanto, serão devidamente aprofundadas em sequência.

### **2.1. MECANISMO DE TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO OPERANDO COM CONTROLE DE TENSÃO**

O mecanismo de transferência por curto-circuito é determinado pelas baixas corrente e tensão médias do arco, sendo caracterizado por ter um baixo aporte de térmico, comparando-se a outros tipos de transferência. Na Figura 2.1, é possível acompanhar o mecanismo de transferência de gotas.

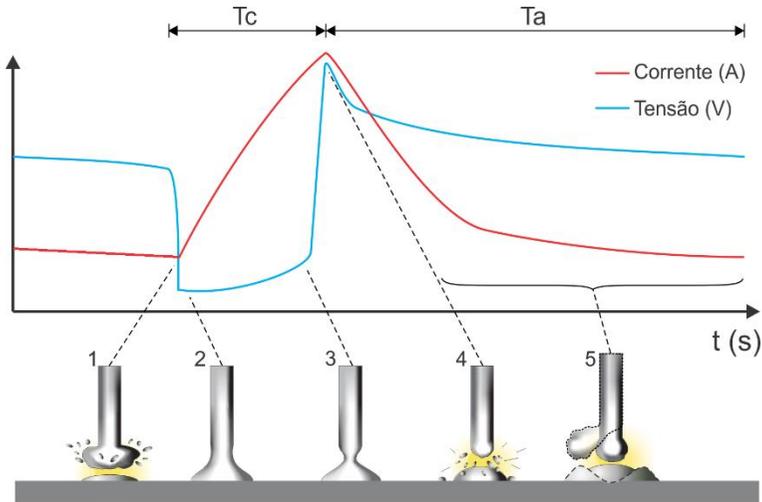


Figura 2.1. Esquema da transferência metálica por curto-circuito convencional, acompanhada pelos oscilogramas de corrente e tensão versus tempo.

Basicamente, na transferência por curto-circuito a deposição de uma gota metálica passa pelas seguintes fases: primeiramente, devido a altas intensidades de corrente, uma porção, já aquecida por Efeito Joule, da ponta do eletrodo recebe um bombardeamento de elétrons, o que eleva a temperatura da região, que começa a fundir, e, devido à tensão superficial, se transforma em uma gota metálica na ponta do eletrodo (Figura 2.1.(5)); Como na soldagem MIG/MAG o eletrodo é continuamente alimentado, a gota aproxima-se cada vez mais do metal de base, e por consequência da característica estática da fonte de energia, a intensidade de corrente cai progressivamente, até o momento, no qual a gota toca a superfície do metal, (Figura 2.1.(1)) se espalhando sobre este e formando a ponte metálica (Figura 2.1.(2)); Neste momento, caracterizado como curto-circuito, a corrente tende a subir. No entanto, devido ao surgimento de forças de origem eletromagnéticas, a ponte metálica é comprimida formando uma região de estricção nas adjacências do eletrodo, efeito *Pinch* (Fig. 2.1.(3)), este efeito é proporcional ao quadrado da corrente e torna-se maior quanto menor for raio do condutor (para uma mesma corrente) [9]. Somando-se o efeito *Pinch* com a força de tensão superficial gerada na poça de fusão, a ponte metálica é desfeita, a gota é depositada na peça de soldagem (Fig. 2.1.(4)). Inicia-se um novo ciclo de transferência, que, para transferência por curto-circuito de um arame de aço carbono comum de diâmetro de 1,2 mm, tem um período típico entre 8 e 15 ms.

Os maiores inconvenientes da transferência metálica por curto-circuito convencional são: no momento em que a gota toca a poça de fusão a corrente aumenta instantaneamente e consideravelmente a sua intensidade, e como a área da região inicial do toque é ínfima, as forças eletromagnéticas irão repelir essa gota, o que pode ocasionar a formação de respingos, a deformação da gota e da poça de fusão e gerar oscilações indesejadas na região, somando ainda o fato que a região irá sofrer um elevadíssimo aquecimento por efeito Joule, formando gases no interior da gota fundida, que podem causar micro explosões e expulsão de material [6,8,9,10]; A gota nem sempre é perfeitamente esférica o que pode gerar curtos-circuitos prematuros [8,9,5]; No momento da ruptura da ponte metálica a intensidade da corrente é muito elevada, o que, também, gera a repulsão da gota e a expulsão de material da região formando respingos [6,10]; Como a intensidade de corrente cai após o rompimento da ponte metálica não existe um tempo definido de fusão da região, formando gotas de tamanho muito variável acarretando em dificuldades na dinâmica da transferência [8,10].

A força eletromagnética é de longe o fator mais importante no mecanismo de transferência metálica [11], entretanto, na transferência por curto-circuito a tensão superficial desempenha um importante papel durante a soldagem. Um exemplo é a sustentação estável da poça metálica sem qualquer sistema de *backing* em soldagem de raiz. E, também, na determinação dos mecanismos de transferência metálica por curto-circuito, pois, além de agir sobre a formação da gota e estabilização da poça de fusão e da transferência metálica, variações na tensão superficial do material fundido afetam a molhabilidade, distribuição e preenchimento de juntas em qualquer processo de soldagem.

## 2.2. TENSÃO SUPERFICIAL

Em um sistema líquido-vapor, que é o caso da formação da gota na soldagem, na superfície do líquido existe uma atração resultante para o seu interior, pois sua densidade molecular é muito maior. Devido a esse efeito o líquido tende a contrair-se para o menor tamanho possível, e então, na ausência de restrições externas, torna-se uma esfera.

No caso do sistema sólido-líquido, este efeito direciona-se para o interior do sólido o que tende a prender o líquido neste. Caso da interface entre os conjuntos eletrodo e a gota e poça de fusão e metal de base. Isto irá contribuir para o espalhamento do metal fundido na peça e, quando em transferência metálica por voo livre, tenderá a dificultar o destacamento

[6,12], no entanto, para transferência por curto-circuito esse efeito irá contribuir para reter o material líquido da gota na poça de fusão [13,14]. Devido ao toque da gota com a poça de fusão, a tensão superficial, auxiliada por forças de origem eletromagnéticas, passa a facilitar a transferência, pois a energia livre de superfície torna-se menor na poça metálica, puxando a gota para o seu interior [14].

Trabalhos buscam apresentar maneiras para determinar a magnitude da tensão superficial [15,16,17,18], no entanto esta não é uma tarefa fácil [14,17,19]. A Tensão superficial de um metal líquido puro tende a diminuir com o aumento da temperatura (Figura 2.2) [14,19]. Assim, quando o arco de soldagem induz uma diferença de temperatura na poça, induz também uma diferença na tensão superficial e, por consequência, no fluxo do material fundido.

Outro fator que afeta a tensão superficial é a presença de elementos halogênios, por exemplo, o enxofre (S), Figura 2.3, impureza sempre presente em aços carbono e aços inoxidáveis. Este age com um agente tenso ativo, no sentido de reduzir suas tensões superficiais [6,13,14,19]. Quase todos os elementos de liga reduzem a tensão superficial, particularmente o efeito do oxigênio, enxofre, selênio, antimônio e estanho, é drástico mesmo com adições de quantidades muito pequenas [11].

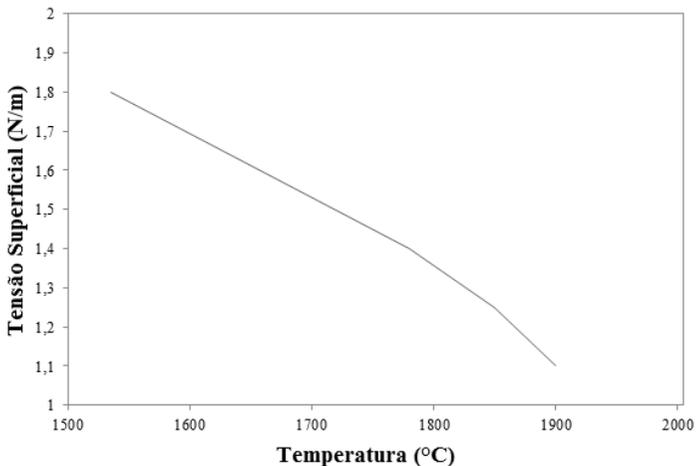


Figura 2.2. Tensão superficial para diferentes temperaturas. Fonte: [6]

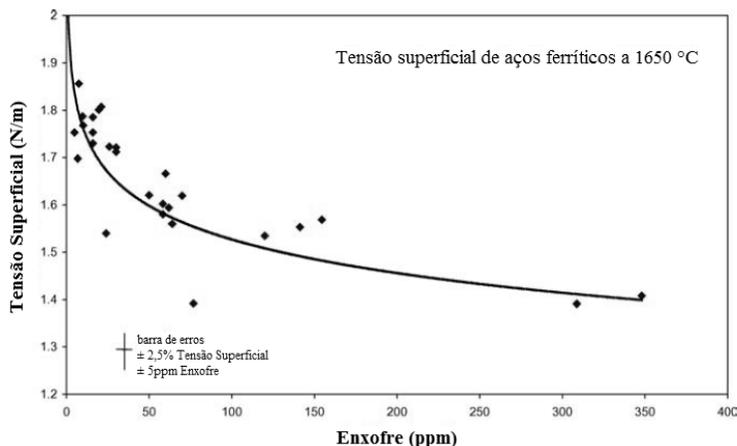


Figura 2.3. Tensão superficial para diferentes concentrações de enxofre. Fonte: [15]

Subramaniam et al. [20] desenvolveram uma técnica para medir a tensão superficial de uma gota metálica do arame ER70S-6 para a soldagem MIG/MAG. Dentro dos procedimentos eles variaram a composição do gás de proteção e, comparando com resultados da literatura obtiveram os valores listados na Tabela 2.1.

Embora haja uma variação nos valores calculados, conforme a composição do gás de proteção muda é possível notar que existe uma clara redução na tensão superficial na presença de  $O_2$  e  $CO_2$  na atmosfera de proteção gasosa, em comparação ao uso de argônio puro [20]. E isto irá refletir-se no mecanismo de transferência da gota metálica.

A magnitude da tensão superficial na gota assume grande importância na definição do equilíbrio com a pressão gerada no interior do volume de metal fundido devido à ação de forças de compressão de origem eletromagnética. Para entender o mecanismo de destacamento, a cooperação entre a força de tensão superficial e as forças eletromagnéticas na região de formação da ponte metálica é essencial. Deste modo, na sequência serão feitas as considerações sobre as forças eletromagnéticas, para então finalizar a compreensão do mecanismo de transferência.

Tabela 2.1. Valores calculados para volume, período de vibração e tensão superficial. Adaptada de [20]

Número da Gota	Gás de Proteção	Volume (mm <sup>3</sup> )	Período (ms)	Tensão Superficial (N/m)	Literatura (N/m)
1	Ar	1,61	2,8	1,52 ± 0,13	-
2	Ar	1,83	3	1,56 ± 0,13	-
3	Ar + Revestimento de S	0,68	2	1,31 ± 0,08	-
4	Ar + Revestimento de S	0,7	2	1,34 ± 0,08	-
5	Ar + O <sub>2</sub> + Revestimento de S	0,73	2,1	1,24 ± 0,08	-
6	Ar + O <sub>2</sub> + Revestimento de S	0,75	2,2	1,16 ± 0,07	-
7	Ar + O <sub>2</sub>	1,46	3,1	1,16 ± 0,09	1,1 a 1,18
8	Ar + O <sub>2</sub>	1,28	2,9	1,1 ± 0,08	-
9	Ar + CO <sub>2</sub>	2,4	4	1,15 ± 0,07	1,2
10	Ar + CO <sub>2</sub>	2,7	4	1,22 ± 0,08	-
Literatura (todos os aços)					0,9 a 1,8

### 2.3. FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS

Considerando que a movimentação dos elétrons pelo interior do arame-eletrodo pode ser descrita da mesma forma que à passagem de corrente em um condutor metálico. Como no interior do condutor metálico se assume a formação de várias linhas de campo paralelas entre si, e, à passagem da corrente, se estabelecerá um campo magnético associado, tal qual o campo magnético que se estabelece em torno de um fio quando por este circula uma corrente elétrica. Como ao atravessar um campo magnético uma partícula carregada sofre a influência deste campo tentando desviá-la de sua trajetória, cada partícula carregada que se move em um condutor estará sujeita a ação de duas forças: uma referente ao campo elétrico, que determina seu vetor velocidade de deslocamento pelo espaço entre os eletrodos; e uma magnética, que surge em função do deslocamento da carga pelas linhas de corrente [21]. A força resultante da interação da corrente gerada, pela movimentação da carga com seu próprio campo magnético, é chamada de Força Eletromagnética ou Força de Lorentz. Esta pode ser dividida em uma componente axial, que atua como agente impulsor, empurrando a gota contra a peça, e uma componente radial que atua como agente constritor, promovendo a separação da gota.

A componente axial da Força Eletromagnética atua dirigida da região de menor área para a de maior área de seção circular de passagem de corrente, desfavorecendo ou contribuindo para o destacamento da gota. A direção e a magnitude das forças eletromagnéticas são determinadas pela distribuição de corrente no interior da gota. Observando a Figura 2.4, se as linhas de corrente divergem (Figura 2.4.a), esta força destaca a gota do anodo. Por outro lado, com a convergência das linhas de corrente (corrente é concentrada na ponta do eletrodo, Figura 2.4.b) a Força de Lorentz empurra a gota na direção do eletrodo. Segundo Nemchinsky apud Rhee [12], uma razão para a alteração da direcionabilidade desta componente axial, é a diferença do tamanho da área em que o arco arde na extremidade da gota com diferentes gases de proteção. Quando se utiliza Ar o arco abrange uma maior porção da ponta da gota, direcionando a componente axial no sentido de contribuir para o destacamento, já para atmosferas de CO<sub>2</sub> ou He, o arco arde em uma pequena área da ponta, fazendo com que, neste caso, a direção seja oposta.

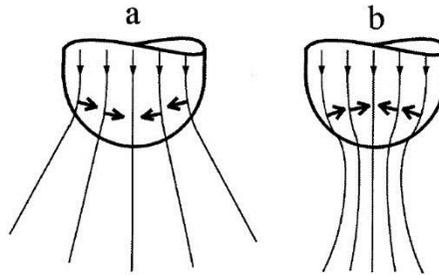


Figura 2.4. Caracterização das linhas de corrente passando do interior da gota para o arco plasma. a) Contribuindo para o destacamento. b) Desfavorecendo o destacamento. As linhas menores e mais grossas correspondem a componente axial da força eletromagnética. Adaptada de [12].

A componente radial da Força de Lorentz, também denominada de Força de Compressão Magnética ou Efeito *Pinch*, está sempre direcionada para o interior do condutor, e é responsável pela constrição da ponte metálica líquida adjacente ao eletrodo sólido, normalmente favorecendo o destacamento, quando existirem intensidades de corrente suficientemente elevadas [6,8,12,21]. Como decorrência da diminuição na área de passagem de corrente, surge às condições para o aparecimento da componente axial da força de Lorentz, esta que passará a atuar sobre o volume fundido presente na extremidade do eletrodo. Evidenciando a importância da componente radial, que, auxiliada pela componente axial, comanda o mecanismo que dá origem ao destacamento da gota metálica. Isto porque, somente após a existência de uma variação na área de passagem da corrente, são geradas as condições para o surgimento de uma força com capacidade de promover o destacamento do glóbulo metálico.

É importante salientar que a ação da componente axial da força de Lorentz como decorrência da constrição da ponte de ligação não se aplica somente à transferência em voo livre, mas também à transferência por curto-circuito. A partir da formação da ponte de líquida entre o eletrodo e a poça metálica, além das forças de tensão superficial, a componente axial também passa a atuar no sentido de destacar o glóbulo fundido da extremidade do eletrodo. Cabe observar que a componente da força atuará no sentido favorável ao destacamento se a área de contato inicial com a poça metálica mostrar-se suficientemente grande. Caso contrário, a componente axial estará direcionada contra a gota metálica, podendo expeli-la, instabilizando o processo de transferência [6,12,21].

Contribuindo ainda para a importância do Efeito *Pinch*, Stava apud Northrup [9] cita a Equação 2.1 para explicar a influência deste efeito quando a transferência ocorre por curto-circuito.

$$G = \frac{I^2(R^2 - r^2)}{10^{+7}\pi R^4} \quad (2.1.)$$

$I(A)$  é a corrente,  $r(\text{cm})$  a distância do centro do eletrodo e  $R(\text{cm})$  o diâmetro do pescoço. Esta equação mostra que a pressão  $G$ , em MPa, é máxima ao longo do interior do eixo central do condutor sólido e decresce a zero no exterior da circunferência. Desta equação, a pressão *Pinch* é diretamente proporcional à raiz quadrada da corrente. O Efeito *Pinch*, como descrito aqui, não pode ser confundido com a “Teoria *Pinch* de Instabilidade” o qual é o mecanismo primário de transferência em outros processos de soldagem sem curto-circuito [9].

Fica claro que no processo de soldagem MIG/MAG com transferência metálica por curto-circuito o comportamento da transferência, a estabilidade do processo e a qualidade da solda são fortemente afetadas pela ação do *Pinch* eletromagnético na ponte líquida durante a fase de curto-circuito, no entanto logo antes do curto-circuito, a forma e tamanho da gota metálica são fatores de relevância equiparáveis [10,11,19]. Pois, o comportamento da transferência metálica e da estabilidade do arco na soldagem por curto-circuito, além de atributos geométricos do cordão, são afetados fortemente por estas características [12,22].

#### 2.4. FORMA E VOLUME DA GOTA METÁLICA

O tempo de destacamento, ou seja, o tempo desde o toque da gota metálica na poça de fusão, o estirricionamento da ponte metálica e a sua completa separação, é inversamente dependente da corrente de soldagem e diretamente dependente do volume e da gota [14]. Sendo os dois fatores citados como tendo fundamental importância na dinâmica da transferência [22], ademais, o formato da gota metálica afeta fortemente o comportamento da transferência metálica e a estabilidade do arco de soldagem [10].

Segundo Zhu et al. [10], o volume da gota logo antes do curto-circuito ( $V_j$ ) é composto de duas partes: o volume de material que restou logo após a transferência ( $V_{j-1}^*$ ); e a quantidade de eletrodo fundido durante o período de arco ( $\Delta V_j$ ).

$$V_j = V'_{j-1} + \Delta V_j \quad (2.2.)$$

$\Delta V_j$  pode ser facilmente regulada controlando a corrente de soldagem e o comprimento do eletrodo. No entanto, controlar o volume de material fundido residual ( $V'_{j-1}$ ) é penoso, mas pode ser minimizado se o toque da gota com a poça de fusão for suave e se a constrição da ponte metálica ocorrer o mais próximo possível do eletrodo.

Considerando  $V_{j-1}$  como o volume da gota após vários períodos de curto-circuito, o volume de material fundido residual ( $V'_{j-1}$ ) dependerá fortemente da sua forma e volume, principalmente para gotas pequenas. E mesmo que seu volume seja fielmente constante, a geometria das gotas varia consideravelmente, e seu efeito na estabilidade do processo é mais expressivo. No entanto, o autor cita que uma gota alongada é mais favorável que uma gota achatada. Esse fato pode ser explicado pelas considerações feitas por Cuiuri et al. [23].

Segundo Cuiuri et al. [23], e confirmado por experiências realizadas no LABSODA, o fator mais limitante para o aumento da taxa de deposição é a tendência do toque do eletrodo não fundido na peça. Isto é causado por erros na detecção da reabertura (assunto que será tratado no decorrer do trabalho) e pela redução no comprimento da ponte do curto-circuito durante o tempo da corrente de curto-circuito, devido à alta velocidade de alimentação. Por exemplo, a 18m/min a frequência média de curto-circuito encontrada pelo autor foi de 33Hz. Isto é correspondente da transformação de 9,1mm de eletrodo em gota. Se a gota for modelada como uma esfera cortada anexada a um eletrodo sólido cilíndrico, isto teria um diâmetro de 2,23mm e um comprimento de 2,14mm ao longo do eixo do eletrodo. Este é o comprimento da ponte inicial esperado do curto-circuito. Assumindo nenhum movimento da poça de fusão durante um tempo médio de curto-circuito de 4ms, então o próximo movimento do eletrodo durante o curto irá reduzir o comprimento da ponte em 1,2 a 0,94mm. Com o movimento da poça em direção ao eletrodo isto pode ir mais além. Isto mostra que quanto mais alongada for a gota maior será o comprimento da ponte metálica e menor será a incidência de instabilidades por topadas do arame sólido na poça de fusão.

Isto contribui também para um aspecto relevante da forma de onda do CCC, na qual a corrente de pico curto-circuito deve ser intensificada ao máximo para promover uma rápida constrição da ponte metálica, evitando a mesma instabilidade citada. No entanto, esta intensidade de subida de

corrente tem um valor ótimo, justificado pela melhora do mecanismo de detecção da reabertura, e será tratada na seção 6.1.

Relacionando as informações angariadas da literatura fica evidente que o controle da transferência metálica pelo controle da forma de onda e monitoramento da corrente de soldagem é fundamental para a controlabilidade e, por consequência, a estabilidade e qualidade do processo de soldagem MIG/MAG em transferência por curto-circuito controlado (CCC), entretanto, para ter um completo entendimento do processo, é necessário conhecer os fundamentos dos processos derivativos de transferência por curto-circuito, bem como entender o funcionamento de algumas tecnologias que já possuem boa aceitação no mercado.

### **3. FUNDAMENTOS DA TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO CONTROLADA EM CORRENTE**

A variante do processo MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito, na qual a corrente é a variável de controle, vem sendo estudada já há mais de três décadas, assim sendo, os equipamentos e os métodos de controle da forma de onda apresentaram progressos valiosos. Os motivos que levaram e levam ao desenvolvimento dessa variante são inúmeros, dependendo da aplicação, e englobam não só aspectos técnicos, mas também econômicos e sociais [8,24].

Inicialmente os estudos buscavam um processo com as vantagens da transferência metálica por curto-circuito suprimindo os inconvenientes do processo convencional, como excesso de respingos e irregularidade na transferência metálica, baixa molhabilidade, inconsistência de fusão, entre outros [6,7,8,9,5,25]. Com o aprimoramento das técnicas, novos objetivos foram sendo almejados, como controle do aporte térmico e controle da penetração independentemente da velocidade de arame [8], mesmo que a redução de respingos ainda tenha valor considerável, pois, além de minimizar desperdícios de material, diminui a danificação de equipamentos ou peças ao redor da região da solda, e ainda contribuir para a melhor visualização do soldador. O aprimoramento das técnicas permitem, também, a utilização de metais de adição de maior diâmetro, o que reduz os custos do processo.

De maneira geral, o funcionamento destes sistemas baseia-se na garantia de que o contato entre a gota metálica e a poça de fusão ocorra em baixo nível de corrente, no fornecimento de uma corrente responsável pela transferência da gota, e na redução de corrente antes que a ponte metálica se rompa e a gota se transfira [6,7,8]. Norris et al. [26] definem três tipos básicos

de processos com controle da transferência por curto-circuito que são apresentados na Tabela 3.1.

Os sistemas listados na Tabela 3.1 não representam novos processos de soldagem simplesmente são uma forma aprimorada de transferência por curto-circuito. Os princípios básicos são os mesmos. Todas estas técnicas de operação almejam menor nível de respingo e melhor desempenho na fusão. Os sistemas diferenciam-se em detalhes na forma de onda e se eles contam com a modulação na alimentação de arame ou não [7,8,24,26,27]. No decorrer deste capítulo serão apresentados os métodos de controle utilizados, bem como as principais técnicas disponíveis no mercado para alcançar estas características.

Tabela 3.1. Categorias de transferência por curto circuito controlado e seus recursos. Fonte: Adaptada de [26]

Categoria	Benefícios	Limitações	Exemplos
Transferência por curto-circuito controlada em corrente	Baixo respingo, baixo aporte térmico, mas boa fusão, bom desempenho na soldagem de raiz	Equipamentos ligeiramente mais caros que os convencionais, mas com impacto insignificante no custo total da soldagem	STT, RMD, FastRoot, Optarc, ColdArc, ColdProcess
Transferência por curto-circuito controlada com alimentação de arame dinâmica <sup>1</sup>	Maior diâmetro de arame. Baixo custo da fonte de energia	Sistema especial de alimentação de arame	CSC
Transferência por curto-circuito controlada em corrente e com alimentação de arame dinâmica	Baixo aporte térmico, baixo respingo, alta velocidade de soldagem em metais ferrosos e não ferrosos	Equipamento mais complexo, muito mais confiável, principalmente em aplicações mecanizadas	CMT

<sup>1</sup> A descrição realizada pelo autor, traduzida do artigo [25] que é referência da Tabela 3.1, com relação ao processo CSC, não reflete a realidade do processo. A maneira como é classificado o processo incita-se ao erro de que este não controla a corrente de soldagem, apenas a velocidade de alimentação de arame, o que não se verifica em outras literaturas que relatam o funcionamento deste processo. Contudo, o autor foi afortunado nas demais classificações.

### 3.1. MÉTODOS MODERNOS DE CONTROLE

Devido a sua alta dinâmica (frequências de alterações - maiores que 100 kHz) e a utilização de processadores de sinais digitais muito rápidos, as modernas fontes de soldagem com módulo de potência controlado por processador permitem otimizar o acerto dos valores regulados de corrente e tensão e, assim, ter uma adaptação excelente do processo para diferentes tarefas de soldagem [24].

Fontes de soldagem modernas foram beneficiadas com o desenvolvimento em eletrônica e da introdução de tiristores, transistores e outros componentes. O transistor, por exemplo, pode ser usado como um resistor variável ou como um switch eletrônico e fontes modernas de energia podem incluir um conversor *chopper*, controlado eletronicamente, ou um inversor. Esta tecnologia tem ampliado o leque de regulagens na fonte de alimentação, tornado a soldagem adequada para aplicações robotizadas, e permitiu a digitalização de realimentação, com velocidades de resposta que passam de milissegundos para nanossegundos, e um controle inteligente do processo de soldagem [28]. Maiores velocidades de processamento e resposta dinâmica das fontes permitem as funcionalidades de controle da estabilidade supracitadas, que irão garantir melhor controle das características dinâmicas das gotas fundidas, melhorando características como, redução de respingos e formação de fumos, por exemplo.

Com progresso no controle digitalizado, houve, particularmente, um rápido aumento na capacidade de controle devido ao uso de PCs de alto desempenho, com possibilidade de controle via software e elevada velocidade de processamento, e alta velocidade de controle de corrente do circuito principal da fonte de soldagem [27]. A Figura 3.1 mostra o tempo de operação para cada um dos fenômenos mais importantes que podem ser controlados na soldagem.

O controle da alimentação de arame também foi fortemente aperfeiçoado pelo controle digital. Entretanto, mesmo com alimentadores de arame que atingem os mais rápidos controles, o tempo de operação não pode ser menor que 0,01 s (100 Hz).

Tempo de Operação		1 s	0,1 s	0,01 s	1 ms	0,1 ms	0,01 ms	1 $\mu$ s
Fenômenos do Arco de Soldagem	Arco							Comportamento dos Pontos Anódicos
	Eletrodo			Ciclo de Transferência de Gota	Características de desgaste do eletrodo	Características do Arco Plasma	Rigidez	Inicialização Características Estáticas
	Poça de Soldagem		Cristalização	Aporte térmico no metal de base Tamanho da poça de fusão Fenômenos térmicos Profundidade da poça				
Controle da Energia das Fontes de Soldagem			Controle Inversor				1982	
			Controle Inversor Digital					1997
Controle do Alimentador de Arame			Motor DC	1969				
			Servomotor AC		2000			
Frequência do Controle		1 Hz	10 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz	100 KHz	1 MHz

Figura 3.1. Tempos de operação dos fenômenos de soldagem e a velocidade de controle das fontes de soldagem. Fonte: Adaptada de [27]

O controle da forma de onda de corrente, dentro do campo da soldagem, não era totalmente digitalizado até o fim dos anos 90 e apenas com o desenvolvimento de microprocessadores e seu aparecimento no mercado tornou-se possível realizar cálculos em alta velocidade [7,27]. Somando a facilidade de realizar atualizações, pois permitem que o *software* seja planejado para sofrer alterações e inclusões de novas funções, bem como, possibilita a utilização de funções já desenvolvidas por outros projetistas [7].

As inovações acima mencionadas tem dado origem a novas oportunidades na soldagem de materiais sensíveis ao calor, tais como alumínio e aço inoxidável, e permitiu união de materiais dissimilares e chapas finas de materiais metálicos. A precisão e flexibilidade do controle das máquinas veem tornando possível aplicar uma variedade de métodos e tem também permitido grande otimização na escolha dos diâmetros de eletrodos, gases de proteção e qualidade de materiais, com impacto significativo na economia da soldagem e na confiança do serviço. Em virtude do emprego destes componentes, foi possível obter um salto significativo na resposta

dinâmica das fontes de soldagem, o que possibilitou o surgimento de novos processos e técnicas de soldagem.

#### **4. HISTÓRICO DO PROCESSO CCC NO LABSOLDA**

O processo CCC já foi tema ou foi citado em aproximadamente 20 trabalhos realizados pelo LABSOLDA, dentre projetos, periódicos, teses e dissertações. O processo é estudado há tempos por pesquisadores do LABSOLDA. Em 1999 foi abordado por Baixo [6] em sua tese de Doutorado, na qual apresentou as minúcias dos fundamentos do processo, em 2002 na tese de Gohr Jr. [7] no desenvolvimento dos equipamentos, e teve um estudo detalhado e uma aplicação prática em 2005, com a dissertação de Silva [8].

Em sua tese Baixo apresentou fundamentos que conduziram a formulação de uma metodologia de controle da forma de onda da corrente aplicada à transferência por curto-circuito, na tentativa de propor uma associação entre a velocidade de alimentação de arame e a corrente de soldagem, utilizou uma relação entre volume fundido do eletrodo e a energia no período do arco. Partindo do princípio que não existiam informações concretas que justificassem uma maior dificuldade na seleção da corrente pela aplicação de uma forma de onda mais complexa, ou seja, o processo MIG/MAG convencional atenderia as expectativas, Baixo realizou comparações entre a forma de onda do curto-circuito convencional com duas formas de onda de corrente, uma baseada em três níveis de energia, Figura 4.1(a), e outra em dois níveis de energia, Figura 4.1(b). E obteve bons resultados, no que diz respeito à estabilidade do processo, utilizando a forma de onda de três níveis de corrente.

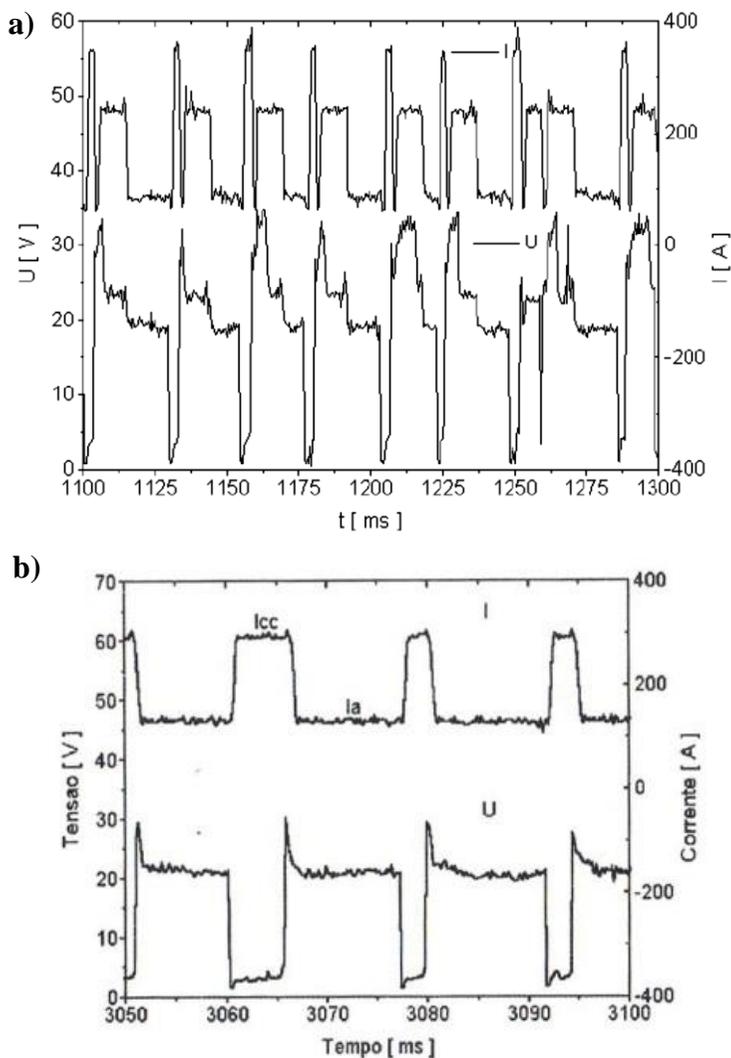


Figura 4.1. (a) Oscilograma para três níveis de corrente. (b) Oscilograma para dois níveis de corrente. Fonte: [6]

Os fatores considerados em sua metodologia do controle da forma de onda de corrente foram: a característica estática da fonte de soldagem, possibilitando o estabelecimento dos valores de corrente desejados ao longo do período de transferência; a relação entre a velocidade do arame e a corrente

de soldagem, permitindo um equilíbrio entre a velocidade de alimentação do arame no arco; e a formação das gotas, bem como sua transferência para a poça de fusão.

Baixo [6] utilizou como critério de estabilidade a produção de salpicos e a não descaracterização da forma de onda por acontecimentos atípicos durante a soldagem, por exemplo, com curtos-circuitos em momentos inadequados. Seu foco não foi à determinação de um método realimentado de ajuste do processo, e também não abordou investigações que envolvessem controle de aporte térmico, penetração e regulagem do tamanho de gota. Diferentemente de Gohr Jr. [7] e Silva [8], que deram mais enfoque para estes fatores em suas pesquisas.

Motivado pela redução do nível de respingos, que são gerados principalmente no início do curto-circuito e na reabertura do arco, Gohr Jr. [7], em sua tese, analisou duas formas de reduzir a corrente do arco nestes instantes, uma delas baseada em um dispositivo eletrônico e outra utilizando controle da forma de onda via *software*.

O dispositivo eletrônico projetado, Figura 4.2(a), constituía-se, basicamente, por uma unidade de controle, um IGBT funcionando como chave e um comando *gate*, e tinha como principal objetivo uma alta taxa de redução da corrente. O curto-circuito era identificado quando a tensão de saída da fonte de soldagem ficava menor que a tensão de curto-circuito ( $U_{cc}$ ) Figura 4.2(b), e a reabertura do arco quando a mesma ficava maior que a tensão de reignição (Uri). Nos dois casos, a chave, fechada por um tempo determinado, coloca em curto a saída da fonte de soldagem, o que desvia rapidamente a corrente para a chave, consequentemente anulando a corrente entre o eletrodo e a peça. Problemas surgiram em função das indutâncias dos cabos causando baixa dinâmica ao processo, além de que, quando a DBCP aumentava, o circuito confundia-se e constatava a iminência de reabertura de arco. Também ocorreram várias extinções do arco no momento da reabertura, seguidas de um novo processo de abertura, instabilizando o processo. Não foi constatada a real explicação para este fato, sendo sugerida a filmagem de alta velocidade para a tal.

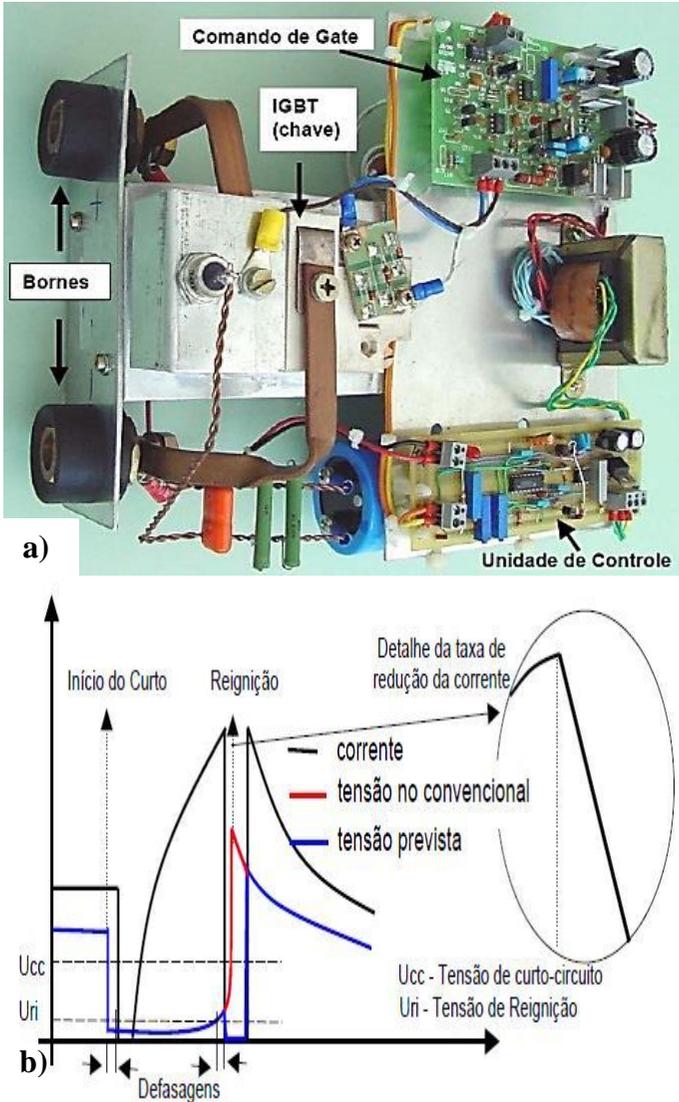


Figura 4.2. (a) Dispositivo eletrônico para controle de corrente. (b) Forma de onda da corrente evidenciando a reignição do arco. Fonte: [7]

Em virtude destes inconvenientes, e devido aos maiores recursos oferecidos, Gohr Jr. [7] optou por continuar os desenvolvimentos com o controle via *software*. Em seu trabalho ele descreve as pesquisas estratégicas

e o funcionamento do algoritmo de controle. Neste contexto pesquisou o comportamento da resistência durante o pico de curto-circuito, Figura 4.3(a), verificando o momento adequado para a leitura da Resistência de referência ( $R_i$ ) e também a validade do relacionamento entre a  $U_{cc}$  e os tempos da corrente de base para manter uma transferência estável em uma mesma corrente, Figura 4.3(b). Sugeriu, também, a investigação de algumas formas de onda, como foi verificado por Silva em 2005.

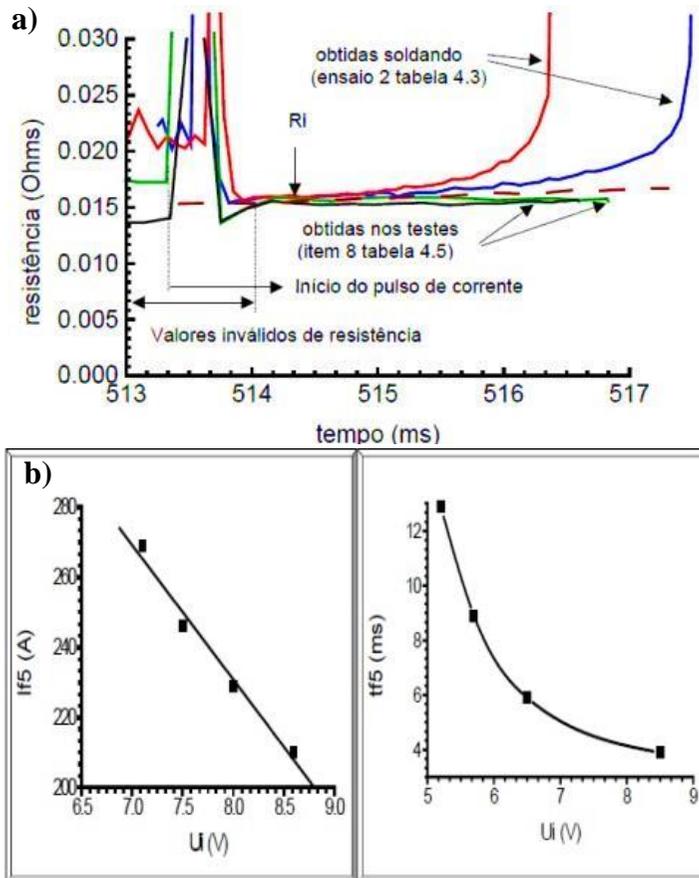


Figura 4.3. (a) Diversos comportamentos da Resistência do circuito de soldagem.  
(b) Relacionamento  $U_{cc}$  x A e  $U_{cc}$  x ms. Fonte: [7]

Silva [8], em sua dissertação, buscou como objetivo geral o desenvolvimento e a otimização do processo CCC vislumbrando sua

aplicação, na construção *offshore* de linhas dutoviárias petrolíferas, para soldagem do passe de raiz, em substituição ao processo ER.

Nos trabalhos de Baixo [6] e Gohr Jr. [7], os pesquisadores testaram algumas formas de onda e adotaram a chamada “forma de onda de três níveis de corrente”, impondo corrente em todas as fases, e esta foi a primeira forma de onda utilizada por Silva, que foi otimizada para a forma de onda da Figura 4.4, em função das suas pesquisas e das flexibilidades dos equipamentos. Suas estratégias de controle continuaram sendo as mesmas adotadas por Gohr Jr. [7], lendo a resistência do sistema para a detecção da iminência da reabertura do arco, e, pela leitura da tensão do sistema, a detecção do curto-circuito e do destacamento. Contudo, realizou estudos para melhor adequação deste controle, juntamente com o aperfeiçoamento da forma de onda de corrente, em todas as fases da transferência por curto-circuito, e a criação do pacote de arquivos DIGI, Tabela 4.1, que contém dados oscilográficos e estatísticos das soldas realizadas.

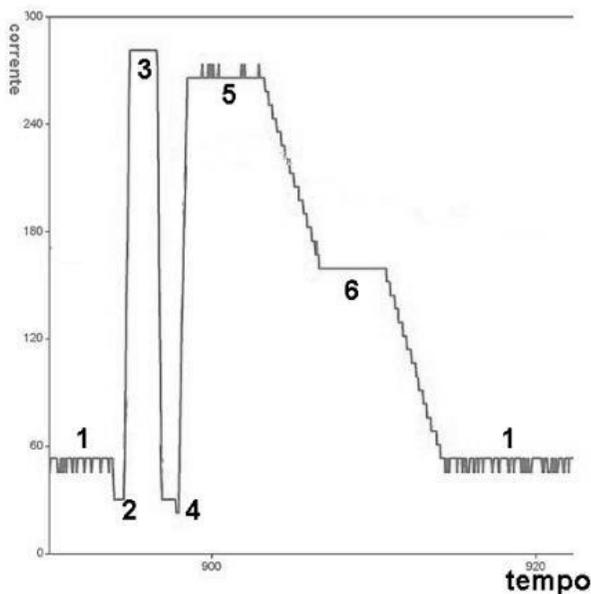


Figura 4.4. Forma de onda de corrente do Processo CCC desenvolvida por Silva.

Fonte: Adaptada de [8]

Tabela 4.1. Pacote de Arquivos DIGI. Fonte: [8]

Arquivo gerado no micro de controle	Função
DIGI2000.0	Onda completa de I, U e R da solda, indicando os pontos de transição entre fases
DIGI200R	Leitura de todos os valores de I, U e R no momento de leitura da DBP ( $U_i$ ) e da $R_i$ (a ser explicado em seguida)
DIGI20TA	Histograma de tempos de arco aberto
DIGI20TC	Histograma de tempos de curto-circuito e total de curtos-circuitos ocorridos
DIGI20TP	Histograma de períodos completos de transferência e tempo total de aquisição
DIGI2TF1	Histograma de tempos da fase 1
DIGI2TF3	Histograma de tempos da fase 3
DIGI2TF4	Histograma de tempos de abertura de arco na fase 4 e quantidade de aberturas ocorridas nesta fase

Além dos testes estatísticos do processo, Silva [8] também realizou estudos referentes à geração de respingos na reignição do arco, estudos sobre a penetração dos cordões de solda, relações sobre volume de gota, estudos sobre o aporte térmico, penetração e da regularidade da transferência metálica, além de testes em corpos de prova chanfrados, bem como a influência do gás de proteção.

Silva [8] concluiu que a substituição do processo ER em aplicações de pipeline é potencialmente, técnica e economicamente recomendável. E considerou importante a continuidade desse desenvolvimento, com vistas à futura implementação em equipamento comercial e aplicação integrada a um cabeçote para soldagem MIG/MAG orbital, além de suas vantagens indiscutíveis em aplicações para passe de raiz, devido criticidade e requerimentos rígidos deste procedimento de soldagem.

Sugere a expansão do uso do CCC, para outras situações de soldagem, como outros materiais, além do aço carbono comum, outros gases de proteção, que não o C25, e bitolas de arame diferentes das de 1,2mm de diâmetro. Também sugere estudos mais aprofundados no controle do aporte

térmico e controle da penetração, assim como filmagens de alta-velocidade para elucidar as questões relativas à transferência metálica, além de estudos de outras formas de onda e outras estratégias de controle do processo, para tornar o CCC um processo de soldagem de nível industrial.

## 5. CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÕES DOS PROCESSOS COM CONTROLE DO CURTO-CIRCUITO

Devido ao tempo hábil, limitou-se a abrangência de consumíveis para arames ER70S-6 de 1,0 e 1,2 mm de espessura, gás de proteção com composição de 75% de argônio e 25% de CO<sub>2</sub>(C25), aplicáveis à soldagem de produtos de aço carbono A36.

Os processos foram monitorados com câmera de alta velocidade e avaliações de oscilogramas de tensão, corrente e potência e velocidade de alimentação. Com a utilização destas tecnologias é possível realizar uma avaliação mais precisa sobre a influência de cada fase do controle do processo na dinâmica da transferência metálica e da poça de fusão. Os resultados das uniões foram avaliados visualmente, pela observação de descontinuidades macroscópicas na superfície e na raiz do cordão de solda, e, quando necessário, metalograficamente, pela análise das seções transversais das uniões.

Monitoraram-se os processos utilizando um sistema de aquisição portátil de dados (SAP) desenvolvido no LABSOLDA e comercializado pela empresa IMC-Engenharia de Soldagem [29]. Estes sistemas podem fornecer uma leitura instantânea da corrente de soldagem, da tensão do arco de soldagem, da velocidade de alimentação de arame e da vazão do gás de proteção e apresenta-los em forma de histogramas e oscilogramas, que serão interpretados para avaliar os processos de soldagem. No entanto, não são apenas essas variáveis que interferem em um processo de soldagem, outras variáveis como: altura do arco de soldagem; comportamento da poça de fusão; forma de transferência metálica; dinâmica do estriccionamento da gota fundida; entre outros fatores, tem igual importância para realizar uma boa solda. Devido à dinâmica destes fenômenos, é complicado visualizar seu comportamento a olho nu. Todavia, com a utilização de filmagem de alta velocidade, é possível ver como os parâmetros regulados na fonte de soldagem agem para a formação do arco e fusão do metal.

Empregando uma câmera de alta velocidade Y4-S2, da IDT, que permite realizar filmagens com aproximadamente 10000 fps [30]. Juntamente com o sistema de aquisição de dados (SDA) do mesmo fabricante [31], adaptado com o TC1 da IMC-Engenharia de Soldagem [32], foi possível anexar às filmagens de alta velocidade, aquisições de corrente e tensão do arco de soldagem, como mostra a Figura 5.1, a uma taxa de aquisição de dados de 25 kHz, permitindo averiguar com maior precisão alterações no processo de soldagem junto com a visualização das curvas de corrente e

tensão de soldagem. Para as filmagens, além dos equipamentos já citados, foram utilizados lentes, filtros e sistemas de iluminação previamente avaliados para a devida aplicação.

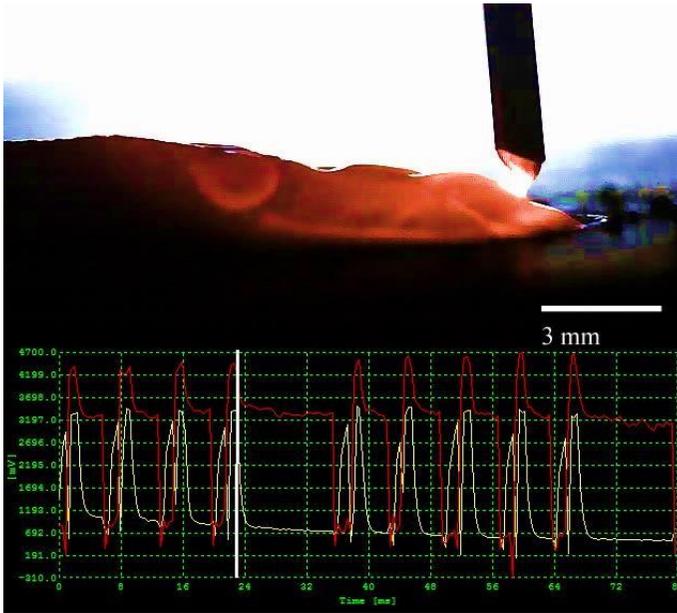


Figura 5.1. Captura do vídeo de alta velocidade da transferência por curto-circuito sincronizada com a aquisição de sinal.

Como as variáveis de um processo de soldagem são muito interdependentes, ver a sua ação permite estudá-las de uma maneira mais precisa. E, conciliando estas duas ferramentas, realizam-se análises mais abrangentes dos processos de soldagem.

No entanto, algumas observações nas formas de onda das variáveis elétricas devem ser realizadas na faixa dos  $\mu\text{s}$ , para melhor compreensão dos fenômenos, como a geração de respingos no momento da reabertura de arco. Assim sendo, em alguns casos, foi necessária a utilização de um osciloscópio, com resolução na frequência de aquisição de 100 MHz.

Na tentativa de situar o processo CCC dentro do mercado dos processos que utilizam a tecnologia do controle da transferência por curto-circuito e angariar conhecimento a respeito de processos comerciais, que utilizam o controle da transferência por curto-circuito, para o confronto com

a literatura e observação e estudo de diferentes comportamentos e desempenhos, no que tange aos fenômenos físicos da transferência de gotas. Foi verificado que as informações que se publicam sobre essas tecnologias, inclusive com cunho científico, justificadas e embasadas em fenômenos físicos da transferência metálica, não necessariamente, de fato, se refletem no desempenho/funcionamento do processo implementado nas fontes de energia. Em outras situações, simplesmente não há informações sobre o funcionamento da tecnologia, ou da versão da tecnologia com os fenômenos físicos envolvidos, apenas relatos de aplicação. Para uma correta comparação entre técnicas e seus respectivos desempenhos frente aos fenômenos e condições físicas presentes, foi necessária a análise de sistemas disponíveis. Há outras opções no mercado, porém, devido a questões de tempo e recursos, foram selecionadas algumas delas. Foram realizados experimentos com duas tecnologias de fontes de soldagem, denominadas no texto de Fabricante A e Processo A e Fabricante B e Processo B.

### 5.1. FABRICANTE A

O processo A é uma variação do processo de soldagem MIG/MAG com transferência por curto-circuito. A representação de sua forma de onda de corrente pode ser observada na Figura 5.2.

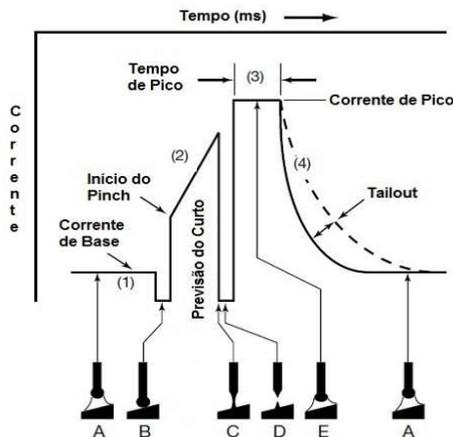


Figura 5.2. Representação da forma de onda de corrente para o Processo A. Fonte: Adaptada de [35]

Este processo impõe um controle na forma de onda da corrente de soldagem, e, segundo o seu inventor, tem a finalidade de garantir uma

transferência por curto-circuito mais estável, com baixo aporte térmico, isento de respingos e com maior confiabilidade para o passe de raiz [9].

Utilizando um osciloscópio para a captura dos dados de corrente e tensão de soldagem para o Processo A, com os sensores conectados nos bornes da fonte de soldagem, obtemos as curvas reais de uma operação de soldagem, apresentadas na Figura 5.3.

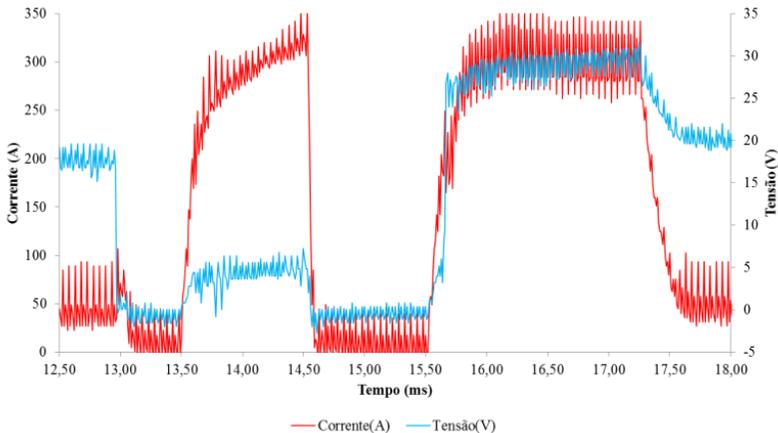


Figura 5.3. Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem para o Processo A obtidos via osciloscópio. Programa ROOT, va 3,4 m/min, TRIM 1, PEAK OFF, metal de adição ER70S-6 de 1,2 mm de espessura, gás Argônio puro.

Interpretando os dados verificamos que a forma de onda de corrente é condizente com o que informa o fabricante [35], e pode-se considerar mais algumas informações importantes para avaliações do controle da transferência metálica: o *ripple* da fonte é de, aproximadamente, 50 A, o que pode levar a erros na interpretação do comportamento de suas variáveis elétricas. Nos sistemas de aquisição de dados, alguns valores de corrente e tensão podem ser mascarados, a alta dinâmica de chaveamento da fonte de soldagem somada a filtros associados os sistemas de aquisição de dados, podem levar a leitura de valores negativos das variáveis elétricas, que na verdade não ocorrem; o tempo com que a corrente perde a intensidade durante o rompimento da ponte metálica está na faixa de 15  $\mu$ s, fazendo com que o destacamento da ponte metálica seja em uma intensidade de corrente baixa, valor no qual as forças eletromagnéticas tem pouca expressão e, portanto, o rompimento da ponte metálica é realizado quase que unicamente pelas forças de tensão superficiais que tendem a puxar o material da gota fundida para a poça de fusão, e a reabertura do arco acontece, virtualmente, sem a formação

de respingos. O *tail-out* é pouco evidente no programa ROOT, como também pode ser avaliado na Figura 5.4; O tempo em que a corrente é mantida no momento do toque da gota fundida na poça metálica é de 0,5 ms, proporcionando uma formação uniforme da ponte metálica [8,26].

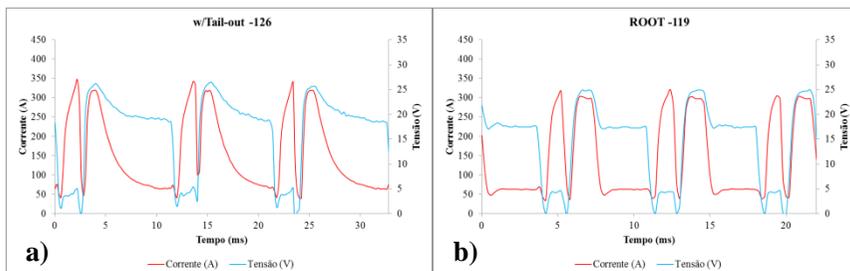


Figura 5.4. Oscilogramas para diferentes programas sinérgicos do Processo A para material de aço carbono, espessura de 1,2 mm e velocidade de alimentação de arame de 3,4 m/min. a) Programa 126 com *tail-out*. b) Programa 119 ROOT.

Existem diferentes programas na fonte para o processo STT, com diferenças na forma de onda, como exemplifica a Figura 5.4, e com desempenhos diferentes para determinadas aplicações, durante testes exploratórios [36], como o nome propõe, o programa *ROOT* teve o melhor desempenho na soldagem de raiz.

Durante os ensaios práticos com o Processo A foi realizado um ensaio para avaliar a forma de controle do processo. Em um depósito sobre chapa de aço carbono A36 de 6,4 mm de espessura, utilizando como metal de adição um arame ER70S-6 de 1,2 mm de espessura, a distância entre o bico de contato e a peça (DBCP) foi alterada para um único cordão de solda. Iniciando em 25 mm e decrescendo, em degraus de 5 mm, até 10 mm. Foi utilizado um robô antropomórfico como manipulador da tocha de soldagem, e, C25 como gás de proteção. Na Figura 5.5 são apresentados os resultados das médias das aquisições de dados.

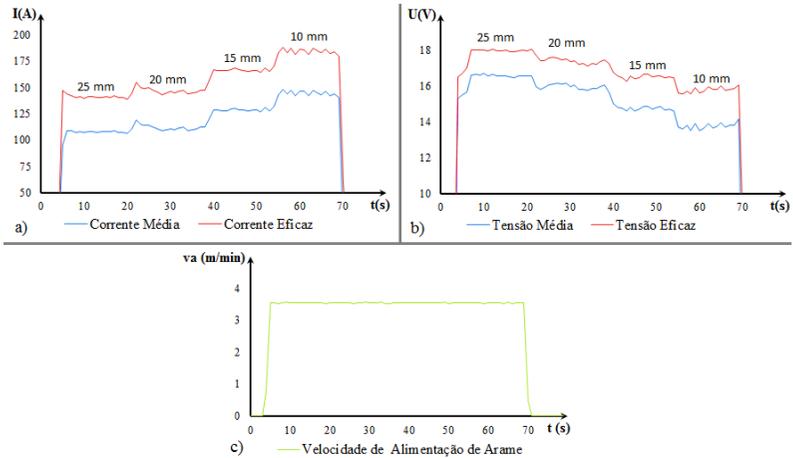


Figura 5.5. Valores médios e eficazes para as variáveis elétricas do Processo A. a) Corrente de soldagem; b) Tensão de soldagem; c) Velocidade de alimentação de arame.

As variações instantâneas de corrente e tensão de soldagem para cada DBCP originaram os oscilogramas apresentados na Figura 5.6.

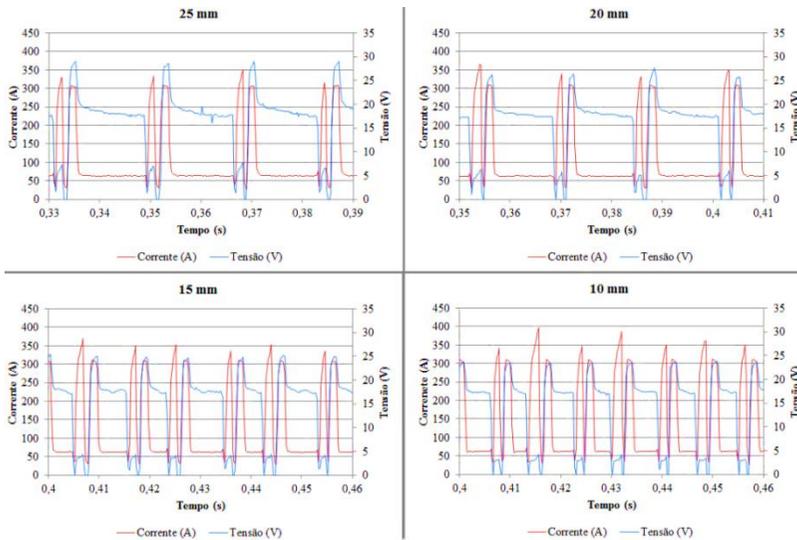


Figura 5.6. Oscilogramas de Corrente e Tensão para 25, 20, 15 e 10 mm de DBCP, para um tempo de 0,6 ms. As curvas destacadas correspondem ao período de regime para cada DBCP, 10 segundos depois da alteração da DBCP.

Pela avaliação dos dados fica evidente o controle em comando de corrente, pois esta variável apresenta os mesmos valores em cada fase para diferentes DBCPs. Ao contrário da tensão que apresenta uma queda na intensidade para distâncias menores.

Na Figura 5.5.a observamos degraus de corrente de soldagem para diferentes DBCPs, o que pode ser explicado pela diferença no período de transferência (Figura 5.6), para distâncias menores a frequência de transferência é maior o que leva a maiores números de picos de corrente e assim aumentando a média desta variável. Esta variação na frequência de transferência, e as filmagens de alta velocidade (Figura 5.7), mostram que não existe um controle no diâmetro de gota para a mesma velocidade de alimentação, ao contrário do que é afirmado pela literatura [9,37]. Também é evidente que, apesar do pulso de corrente (considerado o principal responsável pelo tamanho da gota [8]) ter valores muito semelhantes para os casos apresentados (315 A durante 1,4 ms), o diâmetro de gota é maior para maiores DBCPs. A elucidação desta diferença no diâmetro de gotas é explicada pelo aquecimento do eletrodo por Efeito Joule. É notório que cada gota sofra um determinado número de ciclos de aquecimento ( $C_n$ ) antes de fundir, para DBCPs maiores o eletrodo sofre um maior número de  $C_n$ , o que favorece a sua fusão, aumentando a quantidade de material da ponta do eletrodo que irá fundir formando uma gota metálica.

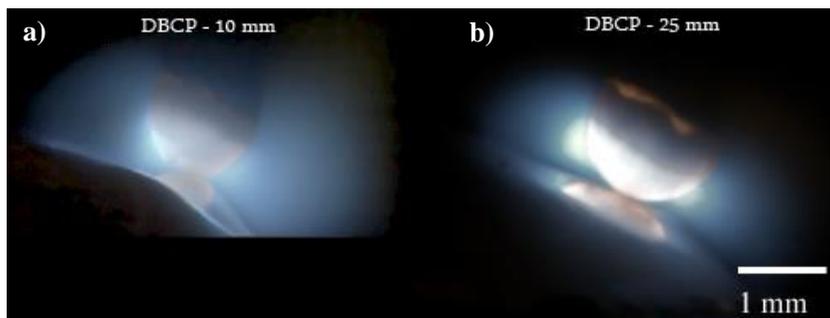


Figura 5.7. Imagem da gota fundida na eminência do toque na poça de fusão. a) DBCP 10 mm; b) DBCP 25 mm.

Na literatura, também, afirma-se que o Processo A é eficiente na realização de passes de raiz, pois, além de ter um baixo aporte térmico, mantém um arco bastante curto o que permite que sejam alcançadas as bases dos chanfros com mais efetividade, e funde melhor as laterais do chanfro o

que proporcionaria melhores propriedades de acabamento a junta soldada [9,37,38].

Na tentativa de justificar essas características do processo foram realizados ensaios sobre chapa de aço carbono A36, utilizando um arame ER70S-6 de 1,2 mm de espessura e CO<sub>2</sub> como gás de proteção. Foram variadas as velocidades de alimentação para os Processos A e MIG/MAG convencional em transferência por curto-circuito. Foram mantidas constantes a DBCP em 15 mm, vazão de gás de proteção em 15 L/min e para cada velocidade de alimentação buscou-se manter o mesmo diâmetro de gota para os dois processos. Para o Processo A regulou-se apenas a velocidade de alimentação, mantendo constante os parâmetros TRIM em 1 e PEAK em *off*. Para o processo MIG/MAG convencional foram reguladas a velocidade de alimentação, a tensão, e os parâmetros de indutância, derivada de subida da corrente de soldagem e derivada de descida.

Calculando uma equação linear com os dados obtidos para cada processo, e apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.2, o gráfico gerado por esta relação é apresentado na Figura 5.8.

Tabela 6.1. Dados obtidos para o processo A

<b>Velocidade de Alimentação (m/min)</b>	<b>Diâmetro de Gota (mm)</b>	<b>Corrente Média (A)</b>	<b>Corrente Eficaz (A)</b>	<b>Tensão Média (V)</b>	<b>Tensão Eficaz (V)</b>
2,28	0,87	108	138,6	16,8	19,7
2,76	0,89	125,6	158,6	15,7	18,3
3,25	0,95	136,8	175,4	16	18,7
3,75	1,02	148,2	195,2	16,3	19,2
4,26	1,13	155,6	209,2	16,3	19,1

Tabela 6.2. Dados obtidos para o processo Convencional

<b>Velocidade de Alimentação (m/min)</b>	<b>Diâmetro de Gota (mm)</b>	<b>Corrente Média (A)</b>	<b>Corrente Eficaz (A)</b>	<b>Tensão Média (V)</b>	<b>Tensão Eficaz (V)</b>
2,3	0,91	83,6	132,2	18,4	19,2
2,8	1	97,2	151	18,5	19,5
3,3	1,06	105,6	166,4	19	19,9
3,8	1,15	115,6	185,6	19,3	20,2
4,3	1,19	123,8	198,8	19,8	20,6

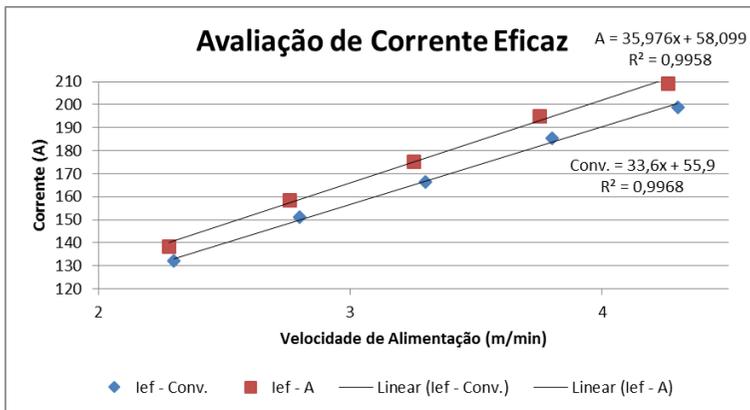


Figura 5.8. Variação da corrente de soldagem eficaz ( $I_{ef}$ ) pela velocidade de alimentação de arame ( $v_a$ ). Processo A (vermelho); Processo Convencional (azul).

Analisando o valor eficaz da intensidade de corrente de soldagem para os dois processos é possível verificar que o Processo A aplica uma maior intensidade para fundir uma mesma quantidade de material o que implica em uma maior potência (Figura 5.9), o que suscita algumas vantagens ao processo frente ao convencional [39].

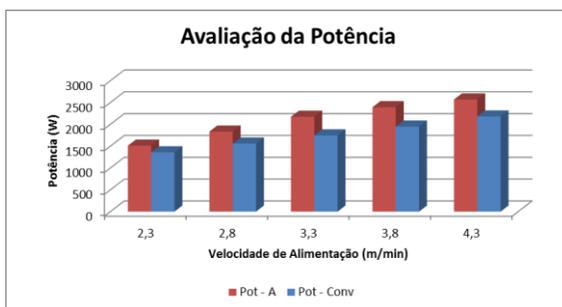


Figura 5.9. Avaliação de potência para diferentes velocidades de alimentação. (vermelho) Processo A; (azul) Convencional.

Como o Processo A aplica uma maior intensidade de corrente média para uma mesma velocidade de alimentação de arame uma maior porção de arame irá fundir e a poça de fusão ficará mais fluída. Isto pode ser constatado na Figura 5.10, pela análise da seção transversal do passe de raiz, averigua-

se que o Processo A, Figura 5.10.a, propicia uma melhor geometria do cordão, maior fusão dos flancos do chanfro e maior penetração em comparação com processo convencional, Figura 5.10.b.

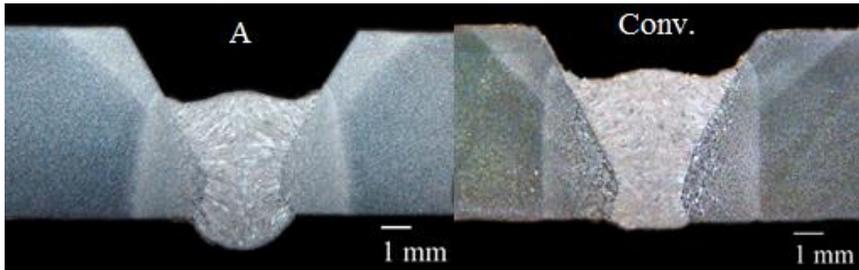


Figura 5.10. Imagem da seção transversal para os processos de soldagem na realização do passe de raiz. a) Processo A; b) Processo Convencional. Fonte: [39]

É possível afirmar que o Processo A apresenta um baixo aporte térmico se comparado ao processo de soldagem com transferência pulsada [40], no entanto, para uma comparação realista, esta deve ser feita em relação a processos que se dedicam a mesma finalidade. Na soldagem de raiz um processo pulsado não se pratica, e, comparado ao processo convencional o Processo A apresenta uma maior energia, além de uma maior eficiência na transferência desse calor para a peça, o que lhe garante as vantagens apresentadas. [39,41]

## 5.2. FABRICANTE B

Introduzido em 2004 o processo B é baseado em um software avançado para o controle transferência por curto-circuito, que controla a corrente de soldagem em cada etapa do curto-circuito. O perfil de onda da variável de controle depende do material a ser soldado, embora seu formato típico é sempre o mesmo, como mostrado na Figura 5.11 [42].

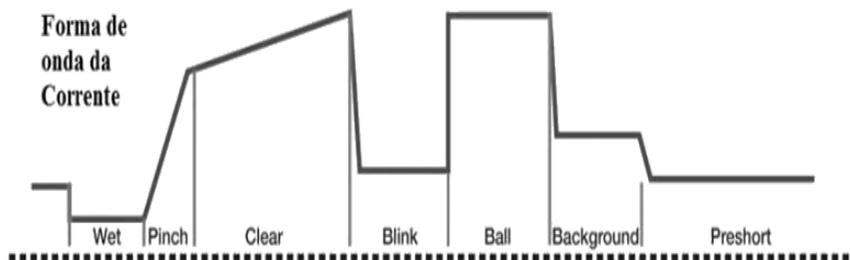


Figura 5.11. Fases do Processo B. Fonte: Adaptado de [42]

Na fonte de soldagem, após a escolha do tipo de material, seu diâmetro e o gás de proteção, podem ser regulados os parâmetros: velocidade de alimentação de arame; *Arc Control*, que controla a largura do arco; e *Arc Adjust*, que controla a altura do arco [43].

Em uma primeira avaliação do processo B, em depósitos manuais sobre chapa, foi estudada a variação do parâmetro *Arc Control* para o arame ER80S-D2 de 1,2 mm de espessura, com resultados apresentados na Tabela 5.3. Mantendo a velocidade de alimentação em 3,8m/min e o *Arc Adjust* em 50, os oscilogramas de corrente e tensão de soldagem e velocidade de alimentação são apresentados na Figura 5.12.

Tabela 5.3. Valores médios e eficazes para alterações no *Arc Control*

<i>Arc Control</i>	0	25	50
Im (A)	155,8	163,8	136
Um (V)	15,9	16,4	17,2
Ie (A)	169,8	181,8	159,2
Ue (V)	17,6	18,2	18,8
va (m/min)	3,4	3,8	3,4
dg (mm)	0,99	1,06	1,05

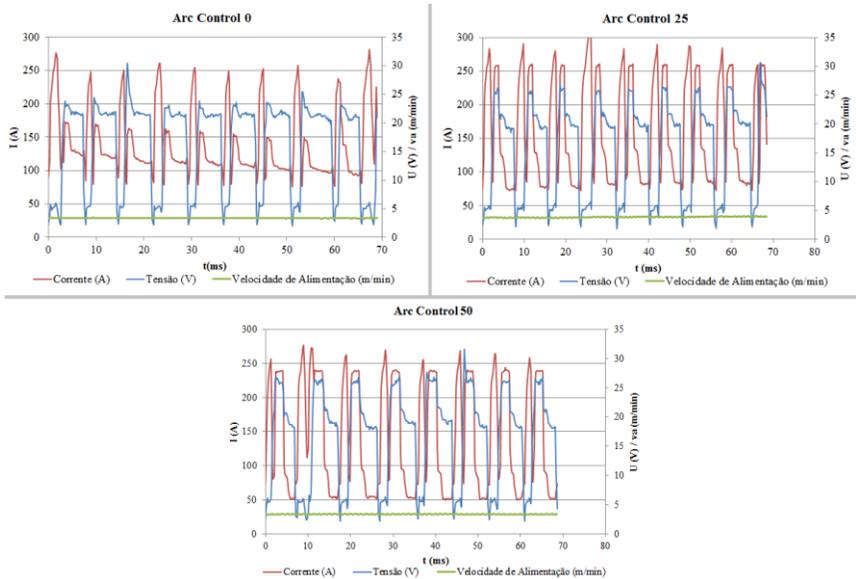


Figura 5.12. Oscilogramas para corrente e tensão de soldagem e velocidade de alimentação de arame variando o parâmetro do Arc Control.

O que chama a atenção, em um primeiro momento, ao analisar a Tabela 5.3 é a alteração da velocidade de alimentação de arame observada para *Arc Control 25*, isto mostra que essa variável pode ser somente uma referência. Como a exemplo, dos processos pulsados com controle adaptativo [44], o valor inicial da forma de onda da corrente para uma dada corrente média é gerada pelo programa sinérgico original, porém, para manter a tensão de referência regulada, a intensidade da corrente de base, e seu respectivo tempo, são alterados. Devido a variações da DBCP em função da soldagem ter sido realizada de forma manual, o que implica, também, em variações na dinâmica da transferência de gota e conseqüente variação dos valores médios das grandezas elétricas.

Como o Processo B é controlado em corrente, mesmo havendo tais variações, podem ser consideradas algumas análises da influência dos ajustes sobre o arco e a forma de onda.

Na forma de onda de corrente do Processo B, avaliado nos ensaios de soldagem, ao alterar o parâmetro *Arc Control*, são alterados os tempos e as intensidades das correntes de pulso, do patamar intermediário e da corrente de base, durante o período de arco, como mostra a Figura 5.13, mantendo a

mesma média de corrente de arco ( $125 \pm 3$  A), no entanto, com uma alteração da pressão do arco na poça fundida (pressão proveniente do pulso de corrente), com reflexos na penetração, molhabilidade e largura do cordão e por consequência na perfuração na soldagem de passe de raiz.

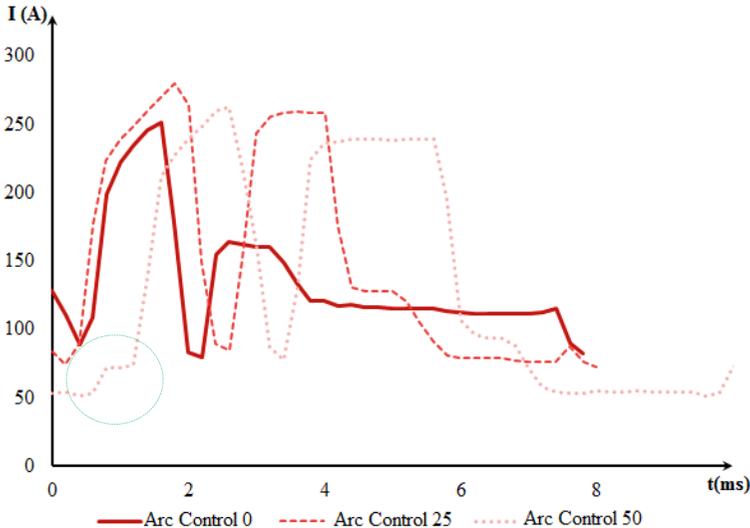


Figura 5.13. Alteração da forma de onda da corrente como consequência da variação do *Arc Control*. O círculo verde pontilhado evidencia o momento que se caracteriza o curto-circuito.

Ao alterar o parâmetro *Arc Adjust*, mantendo *Arc Control* em 25 e a velocidade de alimentação em 3,8 m/min, a fonte também altera os tempo e intensidades da corrente de soldagem no período de arco (Figura 5.14), no entanto, ao calcular a média destes valores, percebemos uma alteração evidente mostrada na Tabela 5.4, o que acarreta em uma alteração na altura do arco, pois uma porção maior de eletrodo será fundida para uma mesma velocidade de alimentação, refletindo também na molhabilidade do cordão de solda.

Tabela 5.4. Valores médios e eficazes para alterações no *Arc Adjust*

<i>Arc Adjust</i>	25	50	75
Im (A) no Arco	95	132	145

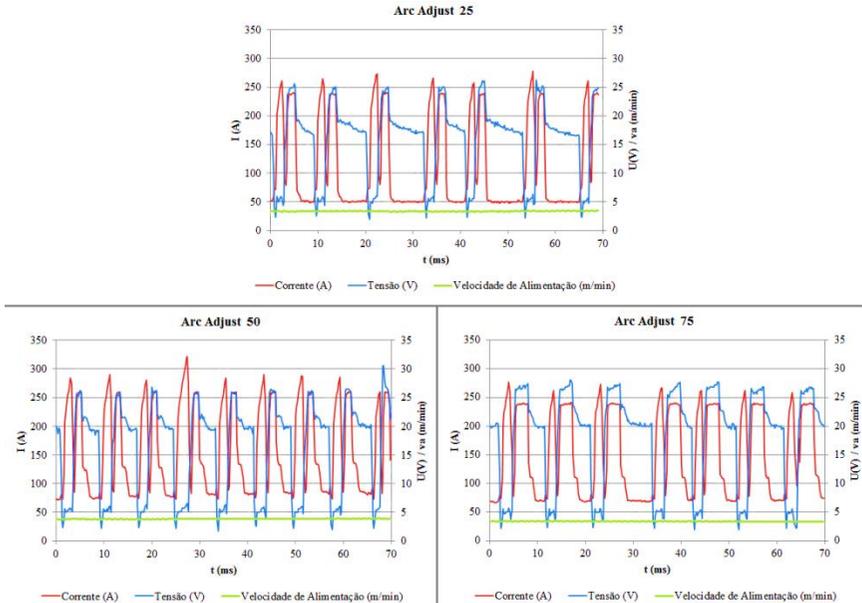


Figura 5.14. Oscilogramas para corrente e tensão de soldagem e velocidade de alimentação de arame variando o parâmetro do *Arc Adjust*.

Observando o período de curto-circuito do Processo B (evidenciado na Figura 5.15 pelo retângulo pontilhado vermelho) é possível averiguar que a fonte leva cerca de  $800 \mu\text{s}$  para reduzir a intensidade da corrente 260 A para 80 A ( $225 \text{ A/ms}$ ), o que, não é compatível com as altas dinâmicas necessárias para maximizar a reabertura do arco em baixas intensidades de corrente, ou seja, é um tempo muito alto, refletindo na grande quantidade de respingos observadas durante os testes realizados, pois existe uma grande possibilidade do arco reabrir em altas intensidades de corrente. Para o processo CCC, resultante deste trabalho, e o processo A praticam-se tempos na faixa de  $15 \mu\text{s}$  para reduzir a corrente de 300 A para 30 A ( $18000 \text{ A/ms}$ ), mesmo na versão anterior do CCC, já se praticava  $2000 \text{ A/ms}$  [8].

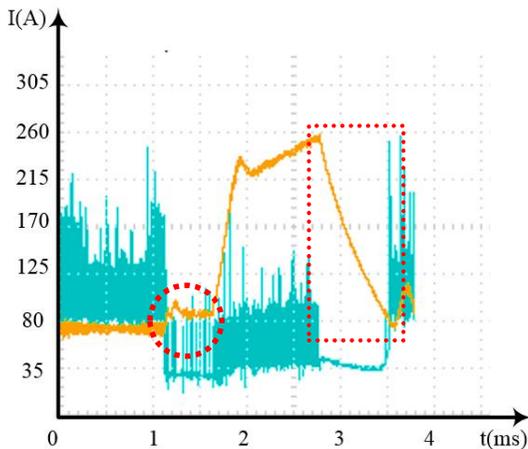


Figura 5.15. Dados de corrente (amarelo) e tensão (azul) de soldagem para o Processo B obtidos com o auxílio de um osciloscópio evidenciando o período de curto-circuito. O círculo vermelho pontilhado evidencia o momento que se caracteriza o curto-circuito.

Outra observação na curva de corrente de soldagem da Figura 5.15, e, nos demais oscilogramas de corrente apresentados anteriormente para o Processo B, é o comportamento da corrente no momento em que se caracteriza o curto-circuito. Ao contrário do que afirma o fabricante, e, em oposição ao que se deseja em termos de amortecimento do toque da gota metálica na poça fundida, a intensidade de corrente é elevada para 90 A, apesar de permanecer neste valor por um tempo de 500  $\mu$ s. Isto aumenta a possibilidade de formação de respingos. Para os Processos A e CCC essa intensidade de corrente é de 30 A.

Na Figura 5.16 podemos visualizar duas diferentes derivadas no decréscimo da corrente: primeiramente mais lenta, e, posteriormente mais rápida. Esta alteração ocorre no momento da reabertura do arco, pois, enquanto em curto-circuito, a energia no indutor interno da fonte está sendo consumida apenas por este, e quando o arco reabre o consumo torna-se maior, elevando a taxa de descida. Isso pode ser observado através do comportamento da tensão de soldagem, percebemos que quando a fonte detecta a eminência de rompimento da ponte metálica ela para de chavear, e então a corrente cai em uma velocidade menor proporcional (desmagnetização do indutor) a tensão na fase de curto-circuito, que tem um valor entre 5 e 8 V. Já quando ocorre o rompimento da ponte metálica, o arco reabre e a tensão aumenta para valores próximos dos 20 V, porém, a fonte

ainda não retomou o chaveamento, e o indutor desmagnetiza-se mais rapidamente, aumentando a velocidade da descida da corrente. Assim, em relação a produção de salpicos e outros fenômenos relativos a reabertura em corrente elevada, o Processo B não é tão eficiente, pois, tem maior chance de reabrir o arco em altas intensidades de corrente, e não se dá por pura tensão superficial (ou quase pura) como no Processo A, e como atingiu-se neste trabalho com o CCC. Neste quesito, mesmo as versões anteriores do CCC eram mais eficientes.

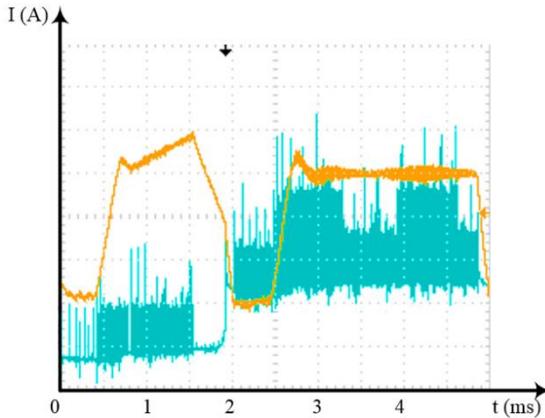


Figura 5.16. Dados de corrente (amarelo) e tensão (azul) de soldagem para o Processo B obtidos com o auxílio de um osciloscópio evidenciando a reabertura e o pulso de corrente.

Baseado em informações obtidas na revisão bibliográfica, e em parte confirmadas nos estudos realizados neste capítulo, é possível separar os processos de controle de curto-circuito em duas categorias, os que apresentam soluções para o controle da energia e estabilidade do processo de transferência sem mecanismos mais refinados para redução de respingos, e os que incluem também tecnologias para redução de respingos.

A corrente de soldagem no processo convencional está livre para variar de acordo com as condições da solda, enquanto que no processo controlado esta é restrita a uma forma de onda imposta durante o arco, sendo o tempo de arco a única variável sem domínio, e este é responsável por aumentar ou diminuir a corrente média/eficaz, e, com isso a taxa de fusão, compensando variações de altura de arco, ou outras que afetem a taxa de fusão. Já durante o curto, a corrente máxima é livre até o momento da detecção da reabertura, as variações de corrente durante o curto-circuito também afetam o

aquecimento do eletrodo por efeito joule. Essas características conferem a soldagens um controle maior da energia, e é isto que permite, por exemplo, a soldagem de chapas finas. Na redução de respingos, além das vantagens já citadas neste trabalho, outra vantagem estaria na preservação da proteção gasosa do arco, mantendo o escoamento, a pureza e qualidade desta. Pois, devido às explosões causadas pelos respingos, gotículas de metal irão alterar o fluxo gasoso, interferindo na qualidade da proteção gasosa.

Baseando-se em todo o conhecimento angariado pelos pesquisadores do LABSOLDA e, juntamente com as análises de processos comerciais, deu-se início aos desenvolvimentos com o processo CCC buscando o aperfeiçoamento de sua forma de onda, do controle da fonte de soldagem e a formulação de um programa sinérgico, cujos caminhos e resultados serão apresentados em sequência nos próximos capítulos.

## 6. DESENVOLVIMENTOS PARA O PROCESSO CCC

### 6.1. FORMA DE ONDA DE CORRENTE

Baseada em um algoritmo de controle, representado pelo fluxograma da Figura 6.1, a fonte de soldagem irá modular a forma de onda de corrente para o processo CCC, cuja representação é exibida na Figura 6.2.

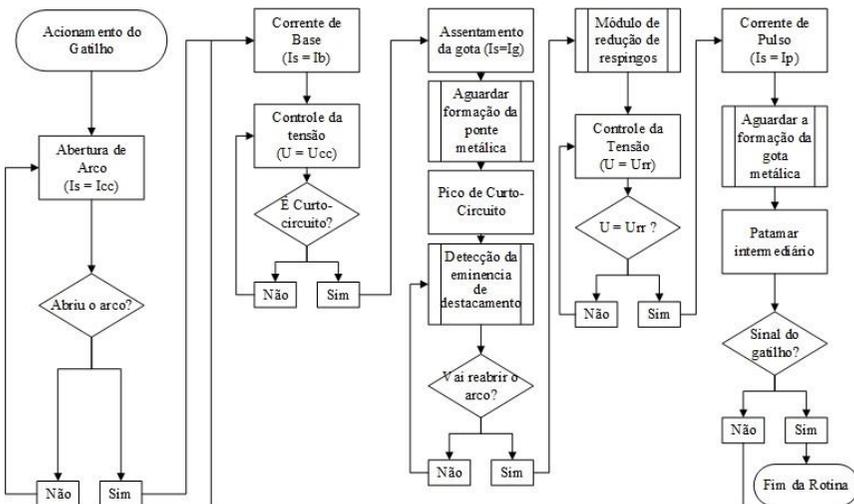


Figura 6.1. Fluxograma do controle da forma de onda de corrente para o processo CCC.

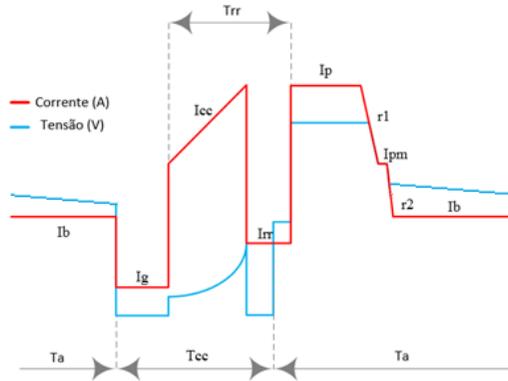


Figura 6.2. Representação da forma de onda de corrente e tensão de soldagem para o processo CCC. ( $T_{cc}$ ) período de curto-circuito. ( $T_a$ ) período de arco.

A Corrente de Base ( $I_b$ ) tem o papel de contribuir para o aquecimento da gota e da poça de fusão. Assim neste período o conjunto irá manter-se quente o suficiente para conservar as propriedades físicas e garantir um assentamento adequada da gota na poça de fusão, evitando que o conjunto acabe se solidificando por completo e ocorram topadas secas entre o arame e a peça. Na prática, sua intensidade deve ter valores menores que 75 A, pois, caso ocorra um curto-circuito prematuro a corrente tem intensidade baixa o suficiente para evitar uma grande repulsão da gota metálica, além de que, com baixa intensidade de corrente, a pressão do arco de soldagem na gota fundida é menor, garantindo uma melhor geometria desta. Foram realizados testes variando a intensidade de  $I_b$ , a principal alteração encontrada relaciona-se com a geometria do cordão de solda, para maiores valores de  $I_b$  maior é o molhamento do cordão na peça (Figura 6.3) e mais plana a face do cordão no passe de raiz. Contudo, quanto maior a corrente de base maior é a quantidade de respingos.



Figura 6.3. Depósitos sobre chapa realizados com o processo CCC para diferentes correntes de base. a)  $I_b=70$  A; b)  $I_b=50$  A; c)  $I_b=30$  A; d)  $I_b=10$  A;  $v_a=3,5$ m/min; eletrodo ER70S-6 de bitola 1,2mm; Gás de proteção C25.

Corrente de Assentamento de gota ( $I_g$ ): neste momento a fonte comanda um valor de corrente de baixa intensidade (30 A). Isto faz com que a gota metálica, ao tocar na poça de fusão, não sofra uma repulsão devido às forças de origem eletromagnéticas, evitando grandes oscilações, tanto na gota metálica, quanto na poça de fusão, permitindo com que a gotas assente-se suavemente sobre a poça. Neste momento, em um processo convencional a corrente irá subir rapidamente, no entanto para o CCC a fonte mantém essa corrente fixa por 0,5 ms, tempo necessário para formação da ponte metálica. Esses tempos foram tomados por observações de filmagens de alta velocidade. Na Figura 6.4 em 1 visualiza-se o momento imediatamente anterior ao toque na poça metálica. Neste instante a fonte reduz a corrente para um valor de 30 A e inicia a contagem de tempo. Em 1 o tempo decorrido é de 43,813 ms. Em 2 observa-se o toque na poça, isento de respingos e de repulsão da gota metálica. Em 3, decorridos 44,293 ms, ou seja, 0,48 ms depois a ponte metálica tem seu diâmetro igual ao do eletrodo, neste instante a fonte comanda a corrente de Pico de Curto-circuito ( $I_{cc}$ ). Em 4 já podemos ver o início da formação da constrição da ponte metálica.

A corrente de Pico de Curto-circuito ( $I_{cc}$ ) tem o papel de garantir a aceleração do estrangulamento da ponte metálica e a separação da porção fundida de arame. Ao contrário da forma de onda de corrente que se tinha anteriormente a este trabalho para o processo CCC (Figura 4.4). Esta, que era quadrada durante o período de curto-circuito, apresentada na Figura 4.4 – Fase 3, agora, neste mesmo período, a fonte de soldagem muda à velocidade

de subida da corrente quando esta atinge determinado valor, que depende da velocidade de alimentação de arame e foi determinada por testes práticos de soldagem. Dependendo da velocidade de subida da corrente no período de curto-circuito o comportamento da ponte metálica será diferente. Quanto mais rápida for esta separação (Figura 6.5), menor será a quantidade de material fundido remanescente na ponta do eletrodo, como mostra a Figura 6.6, para um aumento de intensidade de corrente de 50 A/ms, medindo a área fundida remanescente na ponta do eletrodo, no plano transversal a direção de soldagem, logo antes da reabertura do arco, temos uma média de  $0,6 \text{ mm}^2$ , já para 200 A/ms temos uma média de  $0,4 \text{ mm}^2$ . No entanto, para a detecção da eminência da reabertura de arco, sendo as velocidades muito elevadas, o sistema apresentará maiores dificuldades, portanto, em testes práticos, foi determinado um valor para a derivada da corrente de 70 A/ms, para que a estricção ocorresse da maneira desejada e ao mesmo tempo não limitasse o sistema de detecção.

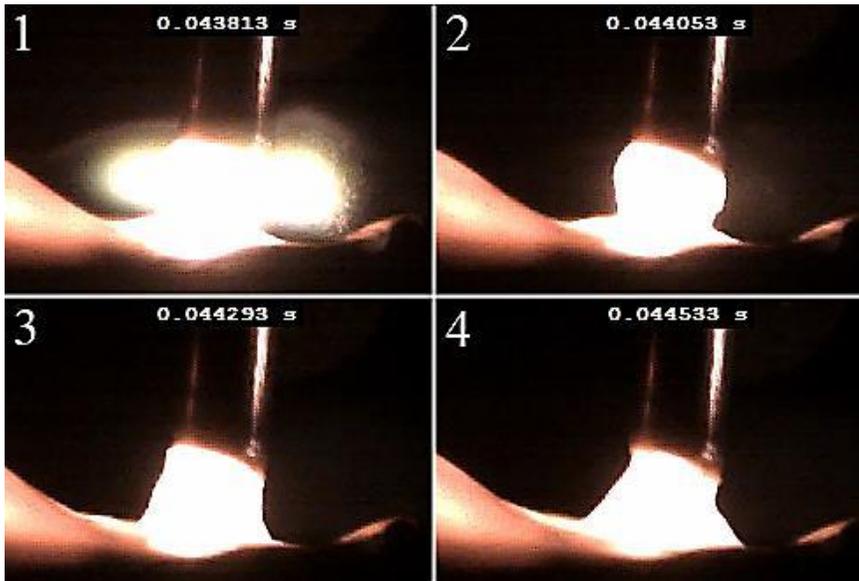


Figura 6.4. Formação da ponte metálica. Taxa de Aquisição: 4166 fps.

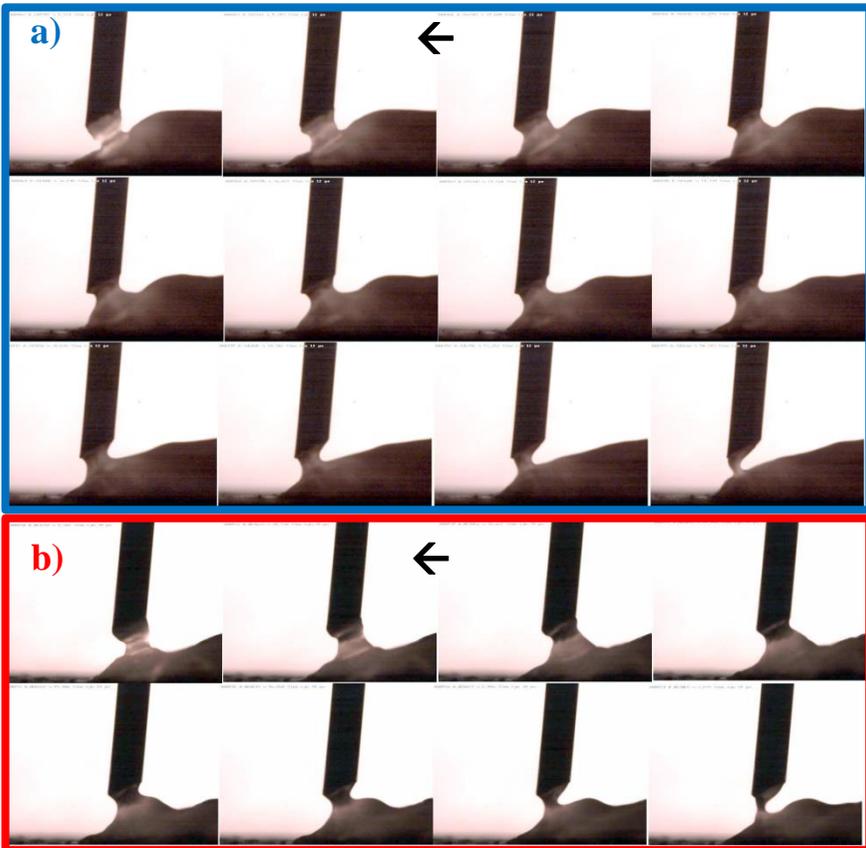


Figura 6.5. Estriccionamento da ponte metálica. a) 50 A/ms; b) 200 A/ms; diâmetro do eletrodo: 1,2 mm. ← Direção de soldagem. Taxa de Aquisição: 4166 fps.

Na Figura 6.7, evidenciado pela segunda queda de tensão no período de curto-circuito, é possível quantificar a quantidade de acerto de queda de corrente no momento prévio ao rompimento da ponte metálica. Se a tensão reduziu de intensidade tem grande chance que o rompimento ocorreu em Irr, pois a tensão, acompanhando a corrente, tende a um valor reduzido proporcional.

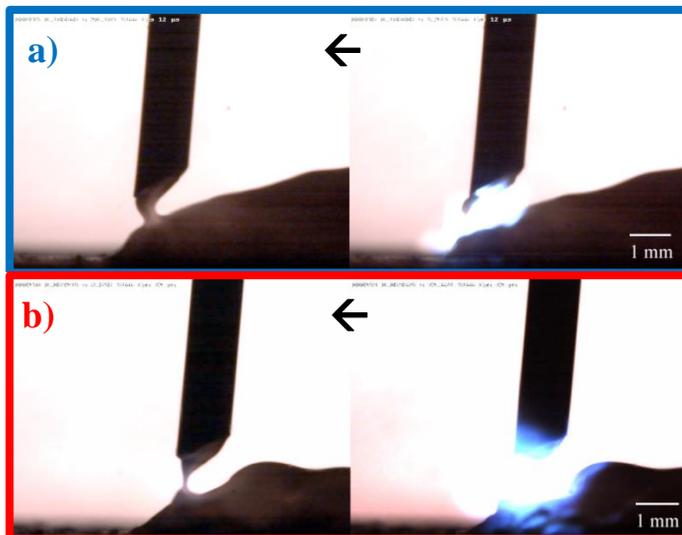


Figura 6.6. Imagens seguintes da sequência da Figura 6.4: a) 50 A/ms; b) 200 A/ms; diâmetro do eletrodo: 1,2 mm. ← Direção de soldagem.

O que irá determinar o número de acerto é o Módulo de Redução de Respingos (MRR), que será descrito na Seção 6.3 deste trabalho. Este inicia seu o monitoramento da reabertura 500  $\mu$ s após o comando de  $I_{cc}$ , e com período de tempo subordinado à reabertura de arco, representado na Figura 6.2 por  $T_{rr}$ .

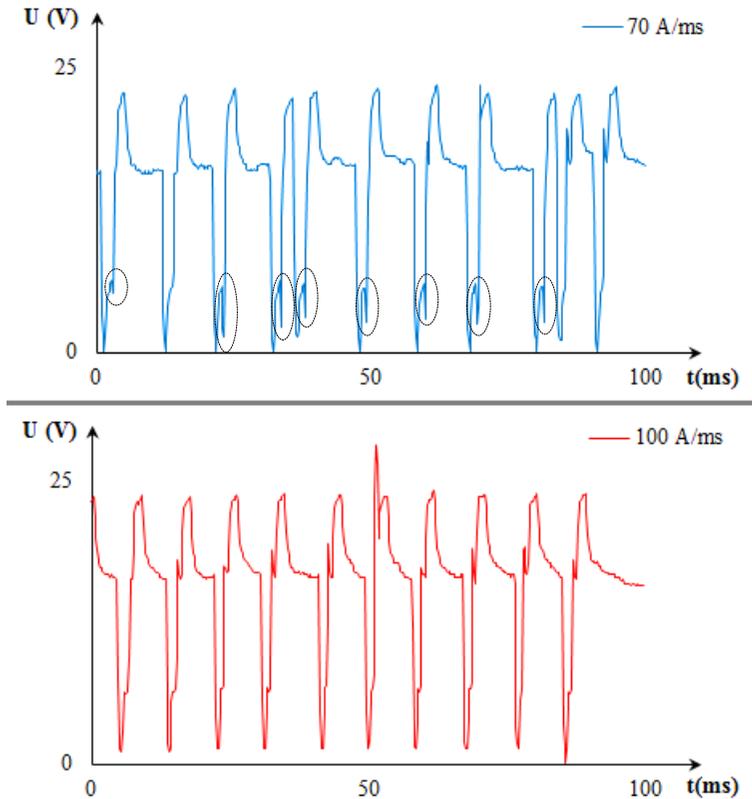


Figura 6.7. Oscilogramas de tensão de soldagem evidenciando o número de acertos na reabertura. Em azul para 70 A/ms; Em vermelho 100 A/ms. O acerto da reabertura é evidenciado pelos círculos pontilhados.

A corrente de Redução de Respingos (Irr) recebeu este nome devido a sua função, que, pela rápida redução da corrente  $I_{cc}$  (cerca de  $15 \mu s$ ) quando da eminência do rompimento da ponte metálica, virtualmente, inibe a formação de respingos relativos à micro explosões no interior do material fundido. As micro explosões são causadas pela alta intensidade de corrente nesta região. A sua intensidade é 50 A e seu tempo será uma consequência da dinâmica de rompimento da ponte metálica (detalhado na Seção 6.3). A chave para um bom desempenho na redução de respingos está na velocidade com que a fonte de soldagem é capaz de reduzir a sua intensidade e será discutida na Seção 6.2 deste trabalho. A intensidade da corrente é reduzida neste período para permitir que o rompimento da ponte metálica se dê por pura

tensão superficial, sem a interferência das forças eletromagnéticas. Pois, como a intensidade de corrente é baixa, as forças eletromagnéticas não exercem praticamente influência alguma, e como a área de união entre o eletrodo fundido e a poça metálica é muito pequena, apenas a atuação da força de tensão superficial que tende a puxar o material do eletrodo para a poça, já é suficiente para romper a ponte, reabrindo o arco.

A corrente de Pulso ( $I_p$ ) tem a função de garantir a formação de uma nova gota metálica e é nesse instante que será definido o fornecimento da maior porcentagem de energia para fundir uma determinada quantidade de eletrodo para cada velocidade de alimentação de arame. Devido à alteração em sua intensidade está irá fundir uma quantidade maior ou menor de eletrodo, e quanto mais rápido for o avanço do eletrodo mais rapidamente este deve ser fundido. Como mostra a Figura 6.8, alterações no tempo e intensidade de  $I_p$  irão refletir proporcionalmente no tamanho da gota fundida. Pelas análises realizadas por filmagens de alta velocidade podem demonstrar esta relação, como na comparação feita para uma velocidade de alimentação de 3,5 m/min. Para um tempo de pulso de 1,3 ms, temos uma área transversal de volume fundido média de 1,07 mm<sup>2</sup> e para um tempo de 1,8 ms temos uma média de 1,29 mm<sup>2</sup>.

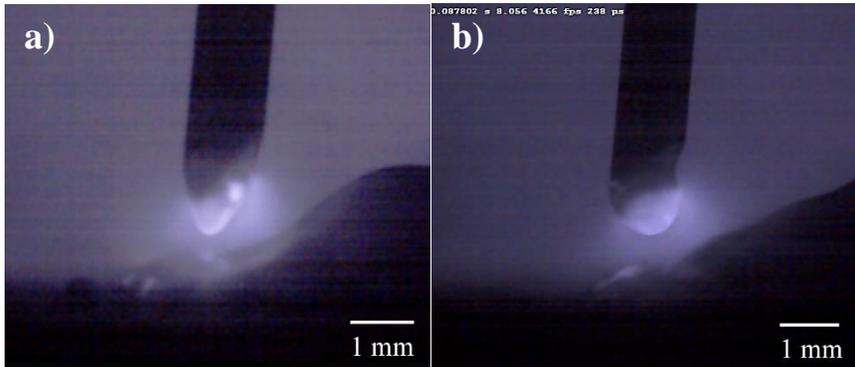


Figura 6.8. Comparação entre tamanho de gotas logo após o pulso de corrente. a) tempo de pulso 1,3 s; b) tempo de pulso 1,8 s.

Buscou-se determinar a corrente de pulso utilizando o valor médio da corrente no período de arco. No entanto, como foi visto na Seção 5.1, o aquecimento resistivo devido a variação da DBCP tem papel relevante na fusão do eletrodo, e, como o tempo e a intensidade de  $I_{cc}$ , bem como o tempo de  $I_b$ , não podem ser controlados, houve uma dificuldade muito grande para

determinar uma relação matemática para determinar os fatores de  $I_p$ . Por este motivo, seus valores foram determinados por testes práticos para cada velocidade de alimentação, de 2 a 6 m/min, com intervalos de 0,25 m/min. A fixação no tempo e na intensidade de  $I_p$  garante maior regularidade no processo de soldagem, pois com esses valores fixados, a mesma quantidade de material irá fundir na ponta do eletrodo, mantendo, virtualmente, o mesmo período de transferência para uma mesma velocidade de alimentação de arame.

Outra função de  $I_p$ , citada na literatura [8,9,37] e constatada por análises de filmagens de alta velocidade, é a pressão mecânica que a alta intensidade de corrente durante este período proporciona para a poça fundida, o que irá empurrar a poça na direção contrária do eletrodo, evitando que o curto-circuito ocorra em altos valores de corrente e antes da formação completa da gota fundida (curto incipiente).

A corrente de Patamar ( $I_{pm}$ ), bem como as rampas 1 ( $r_1$ ) e 2 ( $r_2$ ), irão promover uma regulagem fina no aporte térmico do processo, com o papel de fazer a transição de  $I_p$  para  $I_b$ . Durante testes realizados em passes de raiz, aplicação visada como principal para o processo CCC, mínimos acréscimos no tempo e intensidade de  $I_{pm}$  acarretavam em excesso de fusão (*burn-through*) descontinuando a soldagem. No entanto, não foi possível magnificar a influência desta fase na soldagem, pois, devido à iluminação precária dentro do chanfro, filmagens de alta velocidade não revelaram as causas destes defeitos.

Esta nova forma de onda do processo CCC garante menores variações de energia para uma mesma velocidade de alimentação de arame e, portanto, maior garantia na soldagem do passe de raiz e na soldagem de chapas finas. No período de arco, apenas o tempo da Corrente de Base ( $I_b$ ) é indeterminado e tem intensidade baixa da corrente de soldagem, o que garante variações mínimas de potência para uma mesma velocidade de alimentação de arame. Diferente do processo convencional, em transferência por curto-circuito, neste, durante o período de arco a corrente pode partir de uma intensidade muito elevada, e cair em uma velocidade determinada pela indutância pré-ajustada na fonte ou regulada pelo usuário, o que causa variações na potência instantânea, podendo causar sobrecarga de energia para a determinada velocidade de alimentação de arame, o que pode causar descontinuidades, como perfuração no passe de raiz, ou fusão excessiva no metal de base na soldagem de chapas finas, pois o soldador terá maiores dificuldades em manter a estabilidade da poça metálica.

Ademais, instabilidades como, curtos-circuitos incipientes ou reaberturas de arco inesperadas são facilmente contornadas pela lógica de controle do software auxiliada pela alta velocidade de resposta da fonte de soldagem. Quando um curto-circuito ocorrer antes do previsto, a fonte rapidamente comanda a corrente  $I_g$ , retomando o processo de reabertura do arco. Se o arco reabrir durante o a corrente  $I_{cc}$ , alguns respingos serão gerados, no entanto, como a fonte tem uma dinâmica elevada, a corrente tenderá a baixar para  $I_{rr}$ , o que reduzirá a formação destes salpicos.

As rápidas alterações de intensidade na forma de onda de corrente e o controle da dinâmica do destacamento de gotas são possíveis em virtude dos desenvolvimentos realizados da fonte de soldagem. As características do equipamento serão expostas na seção 6.2, que apresenta os caminhos utilizados para o seu desenvolvimento.

## 6.2. FONTE DE SOLDAGEM

A estrutura de potência para operar com o processo CCC foi desenvolvida a partir de um *chopper* operando no secundário do transformador. O módulo de potência que compõe o *chopper* é responsável pelo controle da corrente principal de soldagem e consiste na estrutura chaveada da Figura 6.9. Nesta estrutura, é empregado um módulo IGBT representado pela chave CH1 e um diodo de Roda Livre (D1). O controle da corrente é obtido dosando-se o tempo em que a chave fica fechada ou aberta. O indutor L1 tem a função de manter a corrente de soldagem enquanto CH1 é aberto, intervalo de tempo em que o diodo D1 entra em condução criando um caminho para a corrente.

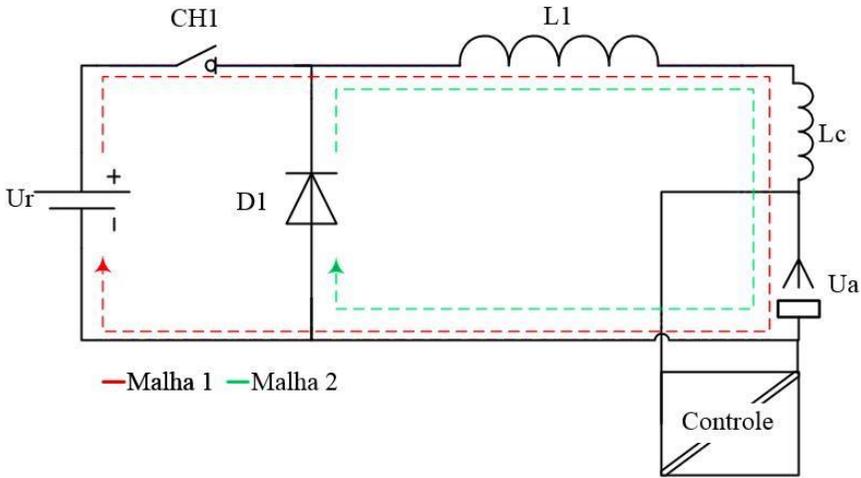


Figura 6.9. Módulo de potência para o fornecimento da corrente principal do processo CCC.

Ao utilizar uma fonte de soldagem chaveada, a corrente de soldagem não é constante, e apresenta uma variação de intensidade conhecida como *ripple*, Figura 6.10. A amplitude desta ondulação ( $\Delta I$ ) relaciona-se com a tensão em vazio da fonte ( $U_r$ ) a tensão do arco ( $U_a$ ), o tempo de condução do transistor ( $\Delta t$ ) e o valor do indutor ( $L1$ ), somado as indutâncias dos cabos ( $L_c$ ), conforme mostram as Equações 6.1.a e 6.1.b [7].  $U_r$  é obtida retificando-se a tensão no secundário do transformador e estabilizando-a com um banco de capacitores.

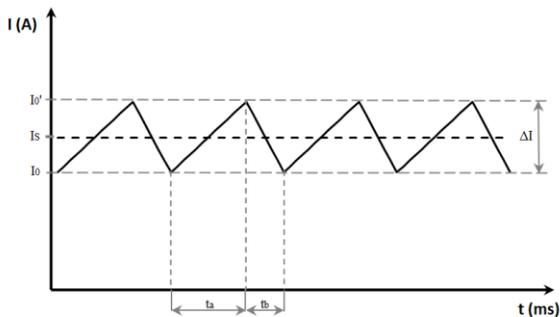


Figura 6.10. Representação do comportamento da corrente de soldagem para uma fonte chaveada. (ta) tempo de chave aberta; (tb) tempo de chave fechada.

Quando a chave CH1 está fechada temos que:

$$\Delta I = \frac{U_r - U_a}{(L + Lc)} * \Delta t$$

$$\Delta t = ta \tag{6.1.a}$$

Quando a chave CH1 está aberta temos:

$$\Delta I = \frac{-U_a}{(L + Lc)} * \Delta t$$

$$\Delta t = tb \tag{6.1.b}$$

Assim, quando CH1 está fechada o indutor é magnetizado pela energia da rede e a corrente de soldagem começa a subir. Quando a chave CH1 está aberta o indutor desmagnetiza-se através de D1 fornecendo energia ao arco, com isso a corrente começa a decrescer. Controlando o chaveamento da fonte, ou seja, os tempos com que a chave abre e fecha, obtém-se a corrente de soldagem ( $I_s$ ) e também irão definir a ondulação de corrente. Quanto maior é o valor do indutor menor é o *ripple* na corrente.

Apesar desta estrutura de potência permitir uma elevada resposta da corrente, e juntamente com o módulo de controle, conseguir desempenhar seu papel ao modular a forma de onda de corrente, a velocidade com que a corrente perde intensidade ainda é muito baixa, pois, observando a Equação 7.1.b, o tempo para descarregar o indutor depende apenas da tensão do arco ( $U_a$ ), cerca de 500  $\mu$ s para corrente de 300 A, que, para o que se almeja no controle da redução de salpicos no sistema do processo CCC, é um tempo muito grande. Assim, para alcançar as velocidades requeridas, trabalhou-se no desenvolvimento de outro módulo denominado de MRR (módulo de redução de respingos), como mostrada na Figura 6.11, que funcionaria apenas no momento de formação da ponte metálica.

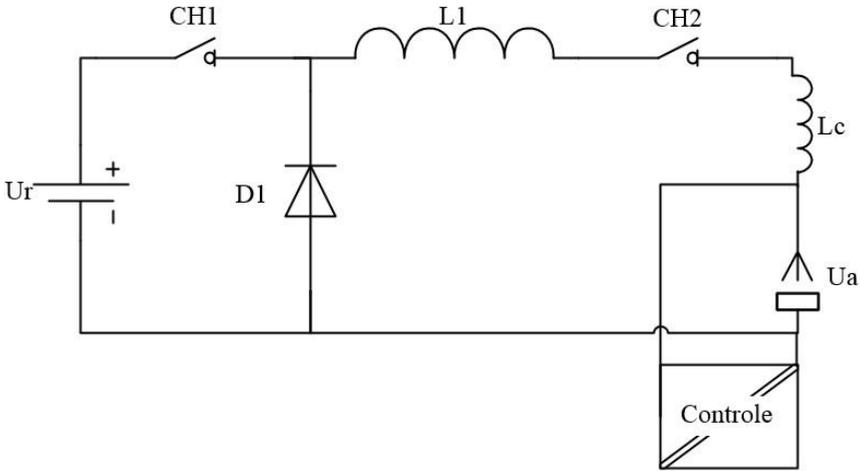


Figura 6.11. Primeira estrutura para o módulo de redução de respingos (MRR).

A ideia básica nessa nova estrutura foi introduzir a chave CH2 com o objetivo reduzir a corrente no momento da reabertura em um tempo muito pequeno, na prática cerca de  $12 \mu\text{s}$  para correntes de 300 A, comparado com tempos na ordem de ms para a estrutura da Figura 6.9, e de  $150 \mu\text{s}$  na estrutura de uma fonte CA usada na versão anterior do CCC.

Entretanto, ao introduzir CH2, surgem três problemas:

- i. Sobre tensão em CH2, que ocorre devido à alta taxa com que a chave (IGBT) anula a corrente, na ordem de 100 ns. Assim, devido à alta variação de corrente em um ínfimo período de tempo ( $\Delta I/\Delta t = \infty$ ), a tensão do indutor ( $U_{L1}$ ) e consequentemente em CH2 tenderia ao infinito, destruindo a chave;
- ii. A anulação total da corrente  $I_{rr}$ , não gerando condições de reabertura de arco;
- iii. Desmagnetização total de L1, desperdiçando energia e tempo para remagnetizá-lo no momento da reabertura.

Para solucionar estes problemas introduziu-se o módulo de proteção de tensão de CH2 (MP), Figura 6.12, o diodo D2 e a resistência R1.

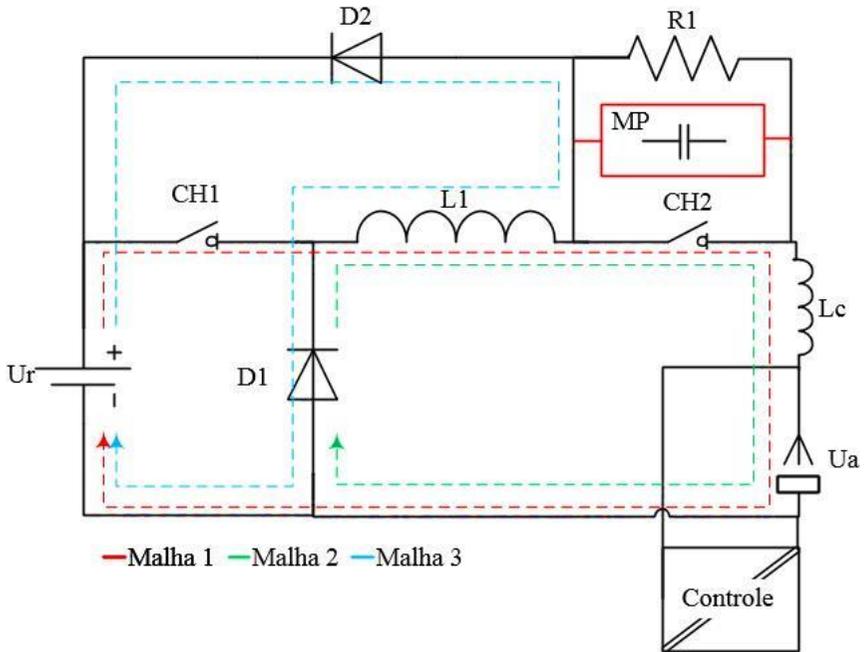


Figura 6.12. Módulo de potência para o processo CCC completo.

Nesta estrutura toda energia que seria destinada a chave  $CH2$ , proveniente de  $L_c$ , é desviada para  $MP$ , que foi dimensionada para que a tensão não ultrapasse 400 V com cabos na ordem de 6 m. Já a resistência ( $R1$ ) é responsável por manter uma corrente mínima de soldagem circulando entre o eletrodo e a peça. Também foi adicionado a este sistema um diodo ( $D2$ ) que cria um caminho para corrente em  $L1$ , podendo ser parcialmente desmagnetizada devolvendo energia para  $U_r$ , quando  $CH1$  e  $CH2$  estiverem abertas, ou ainda, mantendo sua corrente praticamente constante, permanecendo  $CH1$  fechada.

No entanto, o uso de  $R1$  para manter a corrente mínima implica em perdas consideráveis de potência.

$$P_{R1} = \frac{I_r \cdot U_r \cdot \Delta t_{CH2}}{T} \quad (6.2)$$

Considerando a Equação 6.2 na qual  $I_r$  é a corrente, em A, resultante em  $R1$  (de valor 1,2  $\Omega$ ),  $U_r$  a tensão em vazio em V,  $\Delta t_{CH2}$  o tempo de funcionamento do módulo de redução de salpicos em ms e  $T$  o período de

transferência em ms. Utilizando valores reais, para uma velocidade de alimentação de arame de 6 m/min, tem-se:

$$P_{R1} = \frac{60.50.1}{9} \cong 334 \text{ W}$$

ou seja, mais de 300 W de potência podem ser dissipados. Para evitar perdas, ou obter perdas mínimas, uma segunda fonte pode ser associada ao sistema evitando a necessidade de dissipação por R1. O resultado seria a estrutura da Figura 6.13.

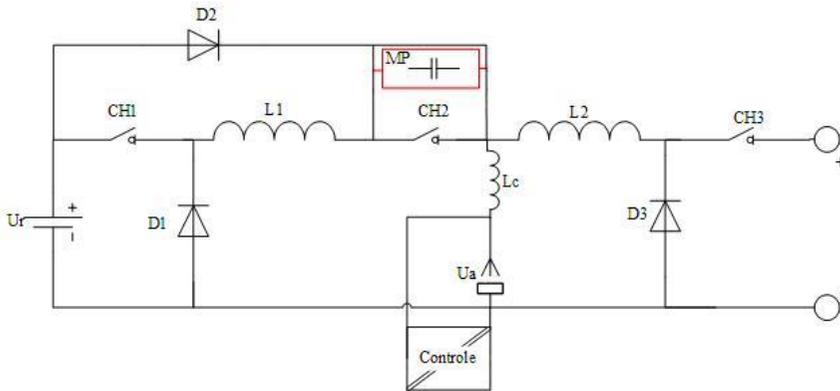


Figura 6.13. Módulo de Potência com fonte auxiliar.

Contudo, não houve tempo hábil para a montagem e testes com esta estrutura, que ficará aqui registrada para a continuação dos trabalhos com o CCC. A estrutura utilizada durante o desenvolvimento do processo CCC foi a da Figura 6.12.

### 6.3. FUNCIONAMENTO DO MÓDULO DE REDUÇÃO DE RESPINGOS (MRR)

A primeira estruturação da reabertura de arco para o processo CCC seguia a seguinte sequência: 1 ms depois de ocorrer o curto o software implementado na fonte fazia a leitura de 3 pontos da resistência do circuito de soldagem e assumia esse valor como um valor de referência ( $R_i$ ); então, baseando-se em um percentual regulável desse valor ( $K_{rab}$ ), o sistema fazia uma nova leitura a cada 100  $\mu$ s e a comparava com o valor  $R_i$ ; quando esse valor era ultrapassado no percentual determinado pelo usuário ( $K_{rab}$ ) o

sistema entendia que estava na iminência da reabertura e enviava o comando para queda de corrente [7,8].

Esta técnica funcionava muito bem para a dinâmica do processo utilizada por Silva [8]. No entanto para as novas pesquisas na soldagem do passe de raiz, entende-se que o aumento da frequência de destacamento auxilia no passe de raiz (adequando melhor a forma e o tamanho da gota metálica e atuando melhor na constrição da ponte metálica). Como isso, o período de transferência foi reduzido de um tempo médio de 28 ms para um tempo médio de 12 ms, o tempo de curto-circuito foi reduzido de um tempo médio de 3,1 ms para um tempo médio de 1,8 ms. Nesta situação de operação observou-se que a lógica de detecção de reabertura do arco não possuía a mesma eficiência, pois apresentava atrasos devido aos cálculos de processamento dos sinais, além de atrasos devido à utilização de filtros para a leitura da tensão de realimentação, Figura 6.14.

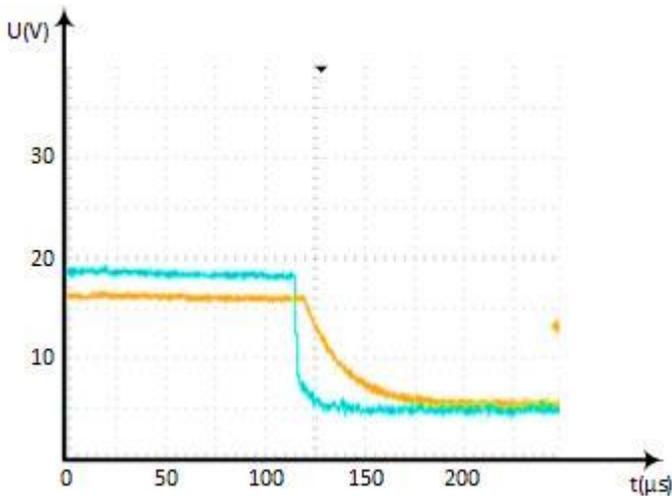


Figura 6.14. Leitura com osciloscópio da tensão real (azul) e da tensão de realimentação (amarelo).

No sentido de aumentar a eficiência e desempenho do CCC em aplicações de passe de raiz foi iniciado um estudo voltado ao aperfeiçoamento da detecção da reabertura do arco. O primeiro ponto identificado foi à necessidade de aumentar a dinâmica de redução da corrente de soldagem, o modelo anterior levava cerca de 150 μs para baixar a corrente de Pico ( $I_{cc}$ ) a um nível que permitisse a reabertura de forma adequada, a 50 A de

intensidade. Assim, o primeiro passo foi desenvolver uma estrutura de potência para reduzir  $I_{cc}$  numa dinâmica bastante elevada. Para isso, aproveitou-se a nova topologia de chaveamento de corrente mostrada no Capítulo 6.2, que tornou a redução de corrente 10 vezes mais rápida, menor que 15  $\mu$ s.

O aumento da dinâmica resultou em um desempenho superior, porém, ainda inferior, quanto ao nível de acerto da detecção da reabertura, ao que era obtido com frequência de transferência menor. Em virtude disso, iniciou-se um estudo mais aprofundado dos principais pontos relacionado à detecção da reabertura, onde se identificou três pontos principais:

- 1- Atrasos provocados pelo filtro dos sinais de corrente e tensão;
- 2- Defasagem gerada pelo isolamento do sinal de tensão;
- 3- Tempo do processamento dos sinais.

Um primeiro passo foi reduzir o valor dos filtros (aumentar a frequência de corte) de forma a reduzir a defasagem e também, implementar uma lógica de detecção da reabertura por *hardware*, reduzindo o tempo de processamento.

Observando-se o sinal da tensão, Figura 6.15, foi possível perceber que existe um aumento na taxa de variação da tensão de curto-circuito de forma significativa no instante que antecede a reabertura. Essa variação ocorre em um intervalo na faixa de 200  $\mu$ s. A primeira tentativa foi usando um circuito derivador, como sugerem alguns autores [9,5]. Entretanto, ruídos remanescentes no tratamento dos sinais acabaram mascarando o sinal da derivada, levando a necessidade de buscar filtros seletivos e circuitos mais dedicados.

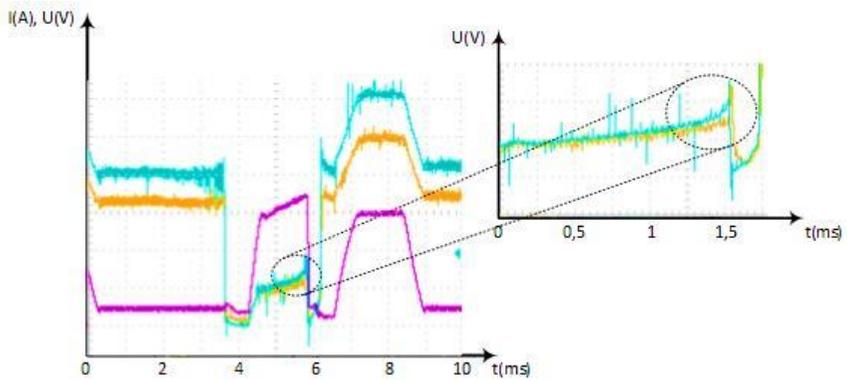


Figura 6.15. Oscilograma de corrente (roxo) e tensão (azul) de soldagem lidas pelo osciloscópio. Com círculo pontilhado evidenciando o tempo de detecção de reabertura.

Juntamente como os ensaios, relativos ao circuito derivativo, foram realizados outros ensaios usando a simples comparação da tensão de curto-circuito com uma tensão de referência, Figura 6.16. Para isso o sinal de tensão era filtrado e era implementada a mesma lógica utilizada para a leitura da resistência. Mas, neste caso, o valor da tensão era comparado a um valor fixo de referência. Os resultados foram bastante promissores, pois, foi possível detectar com boa antecedência a reabertura. Porém, devido à fixação do valor de comparação, eram observados problemas de instabilidade devido à flutuação da tensão de curto-circuito provocada por variações da DBCP, movimentação da poça e dimensões da ponte metálica.

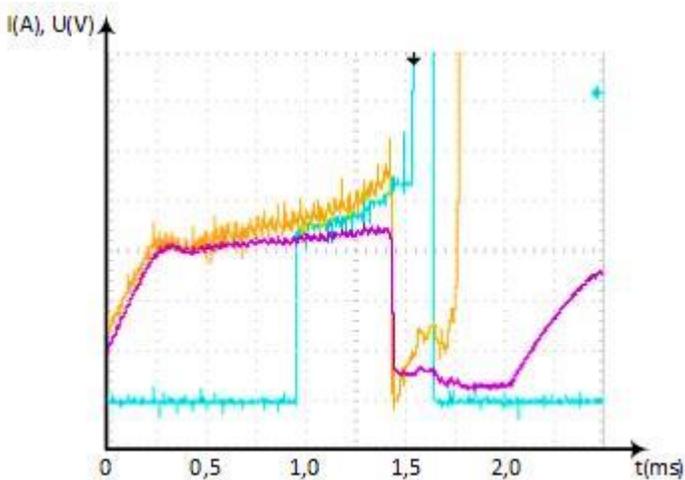


Figura 6.16. Oscilograma para corrente (roxo), tensão (amarelo) de soldagem e da tensão do comparador (azul).

Ainda durante estes ensaios, observou-se um atraso significativo no circuito de isolamento do sinal de tensão, cerca de  $30 \mu\text{s}$ . Todos estes ensaios revelaram muitas informações a respeito da detecção do arco, o que resultou na sugestão de novas concepções de circuito de detecção por *hardware*.

No entanto, na tentativa de detecção por *software*, como é descrito a seguir, os resultados foram tão significativos que permitiram que os objetivos relativos à detecção de reabertura de arco fossem considerados como atingidos, ficando as sugestões de detecção por *hardware* como estudos futuros.

O que permitiu o retorno à detecção por *software* foi a redução dos atrasos relativos ao filtro e ao isolamento do sinal, e uma nova lógica de detecção do arco, baseada na comparação da tensão com um limite de tensão flutuante. Esta nova lógica reduziu o tempo de processamento de software de  $50 \mu\text{s}$  para  $17 \mu\text{s}$ . Assim, considerando que o tempo para detecção da reabertura é de  $200 \mu\text{s}$ , tem-se mais de 20 pontos de comparação.

A lógica, ilustrada pelo gráfico da Figura 6.17, funciona da seguinte forma: passados  $500 \mu\text{s}$  do início do curto-circuito, o sistema começa a fazer a aquisição de dados de tensão; primeiramente são captadas, espaçadas de  $17 \mu\text{s}$ , 12 médias de 3 amostras, separadas em aproximadamente  $4 \mu\text{s}$ , de dados

que são armazenados, criando um *buffer* de comparação; Quando a 13ª amostra é lida a 1ª é descartada e assim sucessivamente, até o momento em que o valor da última amostra lida ultrapassar um valor calculado com base no valor da amostra doze vezes anterior; e o sistema entende que está na eminência de abertura de arco.

É importante que a leitura da tensão seja feita o mais próximo possível da região de soldagem, pois, para diminuir os atrasos na detecção, a intensidade dos filtros dos sinais de tensão foi reduzida, gerando ruídos mais intensos para leituras de tensão nos circuitos internos da fonte. Para isso foram adicionados dois cabos de realimentação (Cabos Ua), um vermelho (positivo) e um preto (negativo). Outra razão para o uso destes cabos é não limitar o uso de tochas e cabos, que, devido à indutância que geram, podem causar atrasos nos sinais. É importante, também, que a passagem dos cabos de realimentação não seja paralela ao mangote da tocha de soldagem ou do cabo-terra, pois isto gera interferência nos sinais devido a indução gerada pelo cabo de corrente da tocha de soldagem.

Esta nova forma de detecção somada à redução dos atrasos tornou a detecção muito mais precisa e culminou em um índice de acerto de previsão de reabertura muito alto para o CCC, inibindo a formação de respingos. Ainda não existe uma maneira de medir esse fator de regularidade com precisão, mas pela leitura dos oscilogramas medidos pelo SAP, para uma velocidade de alimentação de 3 m/min, foi observado um índice de acerto maior que 95%, isto a uma frequência de aquisição de dados de 5 kHz, para 25 ou 100 kHz este índice poderia ser ainda mais preciso. Sugere-se esta implementação no SAP, nível de acerto de reabertura e aumento da frequência de aquisição.

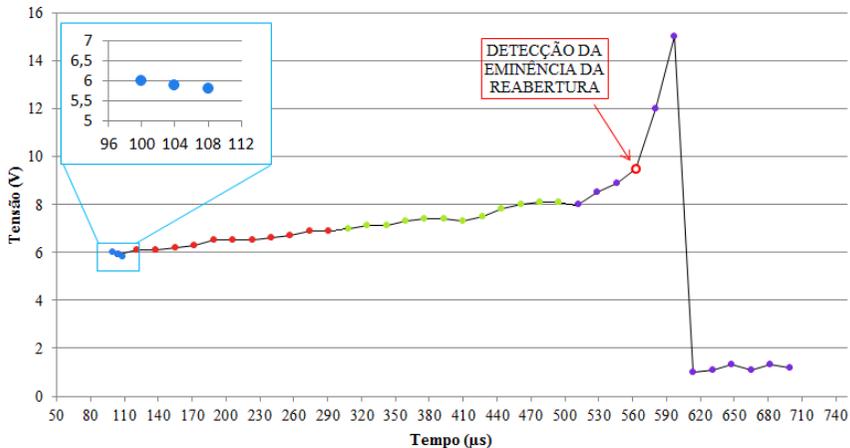


Figura 6.17. Representação da lógica da detecção da iminência do rompimento da ponte metálica.

Pensando em aumentar a frequência de transferência e garantir que o pulso de corrente vai ser dado somente após o arco estar aberto, também foi implementada outra lógica no sistema MRR. No sistema antigo o tempo de  $I_{rr}$  era mantido constante em um valor pré-determinado pelo usuário. Com a nova lógica, ao verificar que o arco abriu, pois o valor de tensão ultrapassou 10 V, o sistema comanda  $I_p$ , com ressalva aos casos em que esse tempo de espera de  $I_{rr}$  seja superior a 1ms, sendo este o caso, a corrente irá subir mesmo não sendo detectado um valor maior que 10 V para a tensão de soldagem. Na Figura 6.18 seguem uma comparação entre o processo MIG/MAG convencional e o CCC, mostrando a eficiência de MRR evitando a formação de respingos.

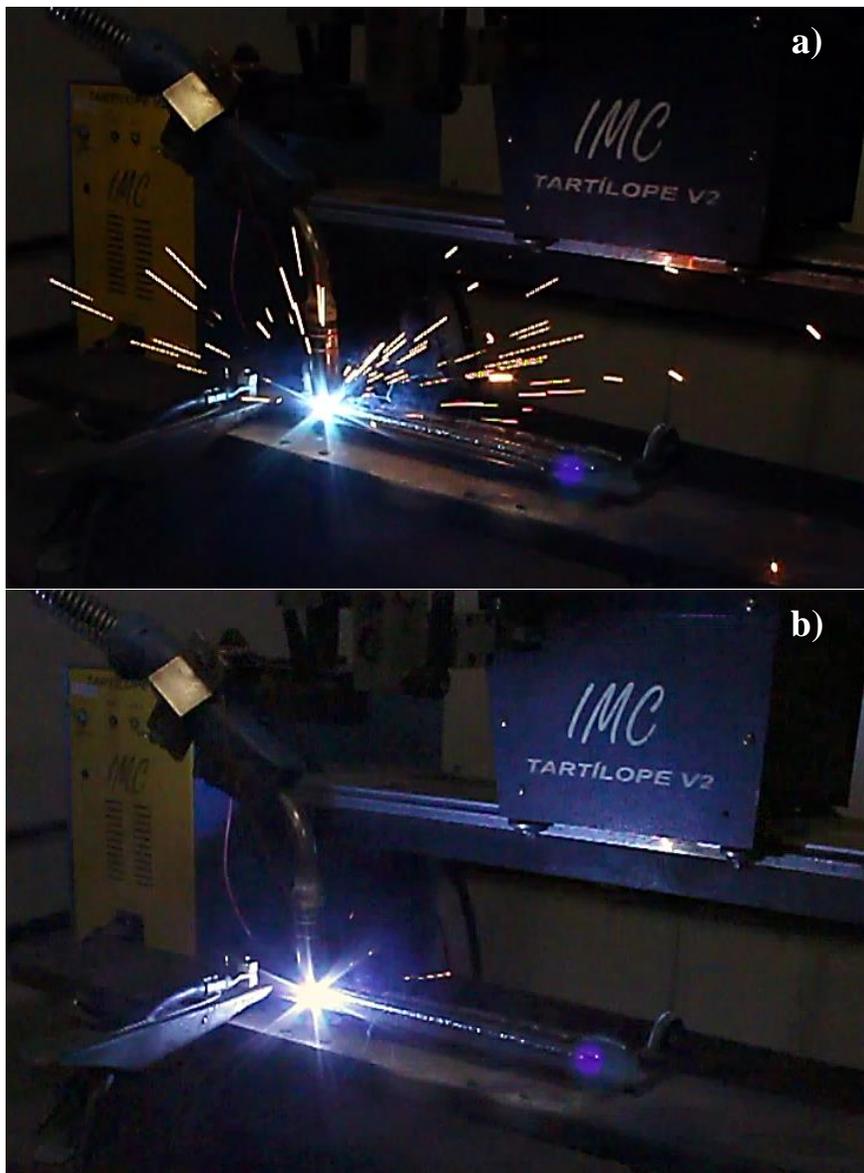


Figura 6.18. Comparação entre o processo MIG/MAG convencional (a) e o processo CCC (b), relativa à formação de respingos.

## 7. FORMULAÇÃO DE PROGRAMAS SINÉRGICOS

Levando em consideração o histórico apresentado para o processo CCC, Capítulo 4, sua aplicação industrial era inviável, sendo utilizado, em sua maioria apenas, em centros de pesquisas. Isto em razão da grande quantidade de parâmetros que deveriam ser regulados na fonte de soldagem antes de realizar o procedimento de soldagem. Na Figura 7.1 é apresentado o *display* da fonte para o processo CCC quando do início dos testes para a formulação de programas sinérgicos.



Figura 7.1. *Display* da fonte de soldagem para o processo CCC antes da formulação do programa sinérgico.

Após acessar o painel principal o usuário deveria regular cinco parâmetros de arco, seis parâmetros de curto-circuito e mais cinco parâmetros de configurações. Totalizando dezesseis parâmetros de regulagem. Desprendendo um enorme tempo do usuário para chegar a uma transferência metálica satisfatória, e executar uma boa soldagem, além do que, exigia um alto nível de conhecimento sobre a física da transferência metálica por curto-circuito.

Buscando tornar o processo mais acessível, iniciou-se o desenvolvimento de um programa sinérgico, que devido ao tempo disponível foi limitado para arames de aço carbono comum (ER70S-6) de 1,0 e 1,2 mm de espessura, utilizando o gás C25.

Neste programa, ao selecionar o processo “CCC SIN” na fonte de soldagem, o display irá apresentar o tipo de material de adição, o gás de proteção e o diâmetro do material de adição. Como apresentado na parte

superior da Figura 7.2.a. Após escolher a sua opção o usuário deve selecionar “CONFIRMA” e o display irá apresentar a imagem da Figura 7.2.b, na qual deverão ser regulados a velocidade de alimentação de arame ( $V_a$ ) e um parâmetro “a” adimensional. Apertar “HAB. SOLDA” que habilita o processo de soldagem.



Figura 7.2. Display da fonte de soldagem para o processo CCC sinérgico.

Ao alterar a velocidade de alimentação a fonte fará as alterações pré-programadas na forma de onda de corrente de soldagem, correspondentes a variações nos parâmetros apresentados na Figura 7.1. “ $V_a$ ” pode ser alterado de 2,0 até 6,0 m/min com resolução de 0,1 m/min.

Alterando “a”, cujos valores vão de -50 a 50, com resolução de 1, a fonte irá atuar na intensidade da corrente de base, modificando a energia no momento do arco de soldagem, para uma mesma velocidade de alimentação de arame. Esta alteração irá provir um cordão com maior ou menor molhabilidade.

Utilizando os conhecimentos angariados e partindo dos resultados apresentados por Silva [8] em sua dissertação, foi obtida a forma de onda de corrente de soldagem para uma velocidade de alimentação de 3,5 m/min. Realizando depósitos sobre chapa foram avaliados todos os parâmetros apresentados na Figura 7.1. A melhor configuração alcançada é apresentada na Figura 7.3.

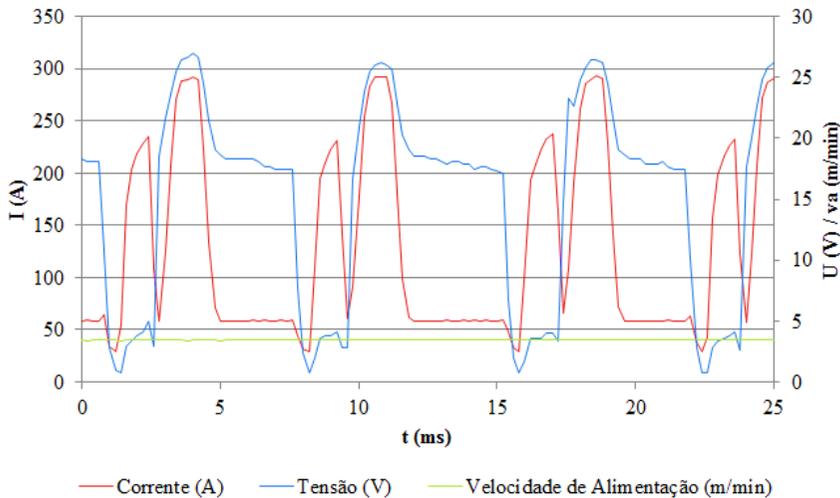


Figura 7.3. Forma de onda de corrente e tensão de soldagem para uma velocidade de alimentação de 3,5m/min.

Para obtenção da forma de onda adequada para cada velocidade de alimentação os testes partiram da forma de onda da Figura 7.3, e foram executados para outras velocidades de alimentação em intervalos de 0,25 m/min. Pela experiência obtida no desenvolvimento, para as demais velocidades de alimentação, alguns parâmetros chave, que são o tempo e a intensidade da corrente de Pulso ( $I_p$ ) e a intensidade da corrente de base ( $I_b$ ), foram alterados, com regulagens finas nos demais parâmetros, buscando o melhor resultado pelos critérios:

- Estabilidade e regularidade das grandezas elétricas tensão e corrente de soldagem;
- Nível de respingos;
- Geometria do cordão.

Dos resultados foi gerada uma lista com os parâmetros para cada velocidade de alimentação. Esta lista foi incluída na lógica de programação do processo CCC, para os parâmetros intermediários de velocidade de alimentação foi realizada uma interpolação dos dados. No Apêndice A seguem os oscilogramas de tensão e corrente para as velocidades de alimentação de 2, 3, 4, 5 e 6 m/min para espessura do material de adição de 1,0 e 1,2 mm e gás de proteção C25.

As velocidades de alimentação tem um valor máximo de 6 m/min. Para velocidades superiores, o destacamento de gota torna-se irregular. Justificadas pela capacidade de corrente da fonte de soldagem.

Observando a Figura 7.4, verifica-se que durante o curto-circuito, em alguns momentos, a fonte atinge a sua capacidade máxima de corrente, que é 450 A, e permanece constante neste patamar. Entretanto, as forças de origem eletromagnéticas precisam ter maior intensidade para formar a constricção e romper a ponte metálica. Contudo, como o valor de corrente permanece constante, esta requer um tempo maior para desfazer o curto-circuito, o que causa os distúrbios apresentados na forma de onda de corrente de soldagem. O arame continua sendo alimentado pelo cabeçote, contribuindo ainda mais para a permanência neste patamar, e, conseqüentemente, para topadas secas do arame com a peça.

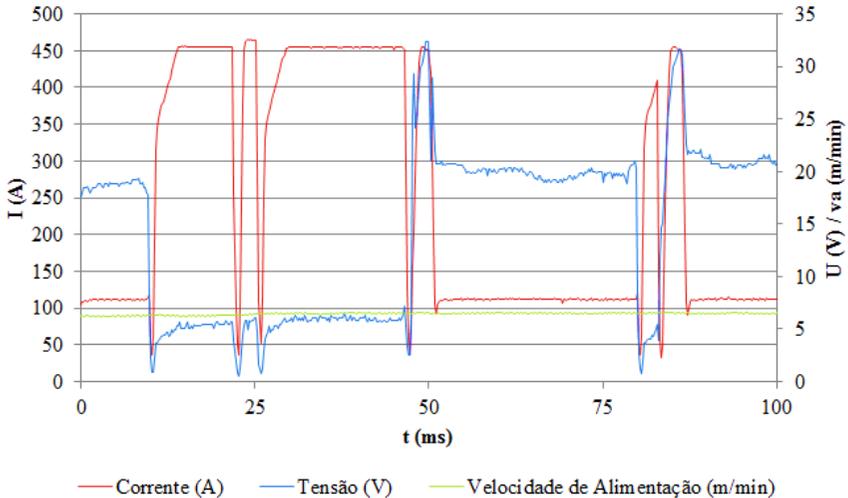


Figura 7.4. Distúrbios na corrente de soldagem para velocidades de alimentação superiores a 6 m/min. ( $va$ ) 6,5 m/min; material de adição ER70S-6 de bitola 1,2 mm; gás de proteção C25.

## 8. DISCUSSÕES FINAIS

A observação de técnicas de controle de transferência metálica presentes em alguns dos sistemas mais difundidos em âmbito mundial permitiu determinar uma macro divisão de sistemas, de acordo com a performance de processo requerida. De maneira geral, se mostrou que as técnicas objetivam em comum a manutenção da regularidade da transferência metálica, em termos de manutenção dos períodos de transferência, da forma de onda, dos valores médios de corrente. No entanto, uma das filosofias engendra esforços tecnológicos (*hardware e software*) para busca de eliminação da formação de respingos, enquanto a outra apenas busca sua redução. Basicamente, se nota esta distinção pela dinâmica observada por aquisição de dados e resultados visuais. O processo CCC, em sua concepção e projeto, se enquadra na primeira categoria. A relevância deste aspecto se dá pelo fato de que, em aplicações para as quais o processo se candidata, instabilidades (extinções de arco, variações momentâneas bruscas de  $I_m$ , perturbações na proteção gasosa, pontos de início de corrosão por respingos aderidos, entre outros) provindas de formação de respingos grosseiros e agravadas por misturas gasosas ricas em  $CO_2$ , ou  $CO_2$  puro, podem ser determinantes para a qualidade das soldas e produtividade (soldas longas e grandes tempos de arco aberto). Também, com o desenvolvimento e implementação de um subsistema, como o MRR, para tentar eliminar a formação de respingos, requer dedicação de esforços e custos adicionais. Foi possível observar que há discrepâncias entre as descrições de funcionamento e embasamento teórico e o real funcionamento de fontes de soldagem comerciais, o que corrobora a pertinência de se obter domínio tecnológico, para levantamentos de informações próprias e maior potencial de desenvolvimento de soluções para o setor industrial nacional.

Com as implementações de *software e hardware* realizadas na fonte de soldagem, foi possível controlar os tempos e as intensidades de corrente para a transferência por curto-circuito, mesmo com requisitos de realimentação de tensão na faixa dos microssegundos. Estas alterações permitem maiores dinâmicas na corrente de soldagem, o que favorece a auto adaptação do processo a variações na gota metálica e na poça fundida e alta regularidade na transferência metálica.

Com o desenvolvimento do módulo de redução de respingos (MRR) foi possível alcançar um nível de respingos, virtualmente, nulo. O que emprega inúmeros benefícios ao processo CCC, como: menores tempos de retrabalho para a limpeza de peças; menores acúmulos de material metálico nos equipamentos de uma célula de soldagem; menores desperdícios de

material; melhor visualização da poça de fusão por parte do soldador; maior estabilidade do processo de soldagem; e mentem-se a qualidade da proteção gasosa.

Foi determinada, por análises de oscilogramas de corrente e tensão de soldagem e velocidade de alimentação de arame, somadas a avaliações feitas por filmagem de alta velocidade, a forma de onda de corrente de soldagem para o processo CCC. O que permitiu a variação de energia necessária para garantir a necessidade de fusão do eletrodo, para diferentes velocidades de alimentação, além de certificar que uma porção semelhante de eletrodo fosse fundida para cada período de transferência, garantindo requisitos para a criação de programas sinérgicos para o processo CCC.

Somando os resultados obtidos com os desenvolvimentos na fonte de soldagem aos resultados angariados para a forma de onda de corrente, foi possível formular programas sinérgicos para o processo CCC. Nestes, utilizando o gás C25 e eletrodos de aço carbono comum de 1,0 e 1,2 mm de diâmetro e a alteração de duas variáveis, é possível soldar com velocidades de alimentação de arame entre 2 e 6 m/min. As variáveis de regulagem são: a velocidade de alimentação de arame, em m/min; e o parâmetro adimensional “a”, este último irá garantir maior ou menor molhabilidade ao cordão de solda.

Os programas sinérgicos diminuem as exigências no treinamento da mão-de-obra. Com a variação apenas da velocidade de alimentação o processo torna-se mais intuitivo para o soldador, que com pouca experiência, comprovados por experiências no LABSOLDA, conseguem realizar um passe de raiz aceitável. Isto traz lucros para as empresas, pois, além de diminuir o tempo de treinamento, pretendem garantir menores retrabalhos devidos a falhas na realização do passe de raiz.

Com a alta regularidade na forma de onda da corrente de soldagem, exímio controle da energia para a fusão da gota e da poça metálica, nula formação de respingos e a facilidade promovida pelos programas sinérgicos, considera-se o processo CCC como um processo de aplicação industrial para a soldagem do passe de raiz.

## 9. TEMAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Desenvolver um sistema de inicialização de processo. O CCC não apresenta uma lógica de inicialização, isto faz com que o processo demore a estabilizar o início da transferência metálica.

Desenvolver um sistema de finalização de processo. Sem uma lógica de finalização o arame pode ficar colado na peça após o fechamento do arco, ou o fechamento do cordão pode apresentar falta de material, fenômeno conhecido com cratera. Então, rampas de finalização irão auxiliar na inibição destes fenômenos, além de garantir a afiação adequada da ponta do eletrodo para iniciar um novo passe de soldagem.

Desenvolvimento e implementação de uma versão de fonte de soldagem sem o MRR, de menor custo, para aplicações menos susceptíveis a formação de respingos.

Foram desenvolvidos programas sinérgicos apenas para eletrodos de aço carbono comum. No entanto, para a união de peças na indústria, outros materiais são requisitados, como aços inoxidáveis, ligas de níquel, alumínio, bem como arames tubulares, entre outros. Tornando necessária a expansão destes programas para outros materiais e diferentes diâmetros de materiais de adição.

Restringiu-se apenas ao gás C25 os desenvolvimentos do processo CCC. No entanto, outros gases, como CO<sub>2</sub> puro, ou com menores concentrações de argônio são muito utilizados na transferência por curto-circuito, além de outras misturas.

Para realizar avaliações mais precisas dos processos citados no decorrer deste trabalho, sugere-se melhorias para o sistema de aquisição portátil (SAP): contagem de acerto no rompimento da ponte metálica; histogramas para leitura de tempos de curto-circuito e tempos de arco para processos controlados em corrente; e aumento da taxa de aquisição de dados. Sugere-se também um estudo da aplicação mecanizada do processo CCC, por exemplo, integrada a um cabeçote orbital e outros manipuladores, e integração com sistemas de sensoriamento para soldagem adaptativa, via arco e via LASER.

Recomenda-se estudos para implementações no cabeçote alimentador de arame, para promover um controle da velocidade de alimentação mais preciso, ou até promover um controle do avanço e retrocesso do arame em

concordância com as fases do processo CCC, aumentando o nível de controle da transferência metálica.

A necessidade de utilização de cabos de realimentação para o processo não pode ser evitada. Contudo, para possibilitar a utilização de qualquer tocha de soldagem, sem necessidades de adaptações, ou ligações de cabos, essa realimentação pode ser feita no cabeçote alimentador de arame. No entanto, devem haver melhorias em *hardwares* e filtros que compensem os atrasos nos sinais de realimentação.

E novos estudos da forma de onda de corrente, como: avaliações do uso da polaridade negativa, o que pode promover melhorias no desempenho de soldagens de revestimento; Aplicação de repetitivos pulsos na corrente de base, de intensidade e tempos menores que os suficientes para promover um crescimento excessivo da gota ou o seu destacamento, acredita-se que isto irá promover uma maior penetração em passes de raiz, sem aumentar a fluidez da poça fundida.

## 10. REFERÊNCIAS

1. CARDOSO, B. . G. K. . R. M. F. . M. R. Visão de Futuro do Indústria de Óleo e Gás. **TN Petróleo**, v. 91, p. 36-73, Set/Out 2013.
2. MIGUEZ, R. Santa Catarina: Polo Logístico do Óleo e Gás. **TN Petróleo**, v. 90, p. 48-55, jul/ago 2013.
3. A2C. Notícias. **SCGAS**, 2014. Disponível em: <[http://www.scgas.com.br/noticia/index/idse/0/id/5933?dt\\_ini=&dt\\_fim=](http://www.scgas.com.br/noticia/index/idse/0/id/5933?dt_ini=&dt_fim=)>. Acesso em: 18 jan. 2014.
4. UTTRACHI, G. D. Welder shortage requires new thinking.. **Welding Journal**, Miami, v. 86, p. 6, Jan 2007.
5. OGASAWARA, T. E. A. A power source for gas shielded arc welding with new current waveforms. **Welding Journal**, 66, 1987. 57-63.
6. BAIXO, C. E. I. **Estudo da Soldagem MIG/MAG pela Técnica Hiperbárica a Seco**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, v. Tese de Doutorado, 1999. 169 p.
7. GOHR JR, R. **Novos Métodos de Controle da Soldagem MIG/MAG**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, v. Tese de Doutorado, 2002. 138 p.
8. SILVA, R. H. G. **Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-Circuito Aplicada ao Passe de Raiz**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, v. Dissertação de Mestrado, 2006. 127 p.
9. STAVA, E. K. The Surface-Tension-Transfer Power Source: A New Low-Spatter Arc Welding Machine. **Welding Journal**, Miami, v. 72, p. 25-28, Jan 1993.
10. ZHU, Z. M. . W. W. K. . C. Q. Numerical Simulation of Molten Droplet Shape and Eletromagnetic Pinch Effect in Short-Circuit CO2 Welding. **Jixie Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 42, n. 7, Jul 2006. 164-169. doi: 10.1016/j.tripleo.2005.04.006.

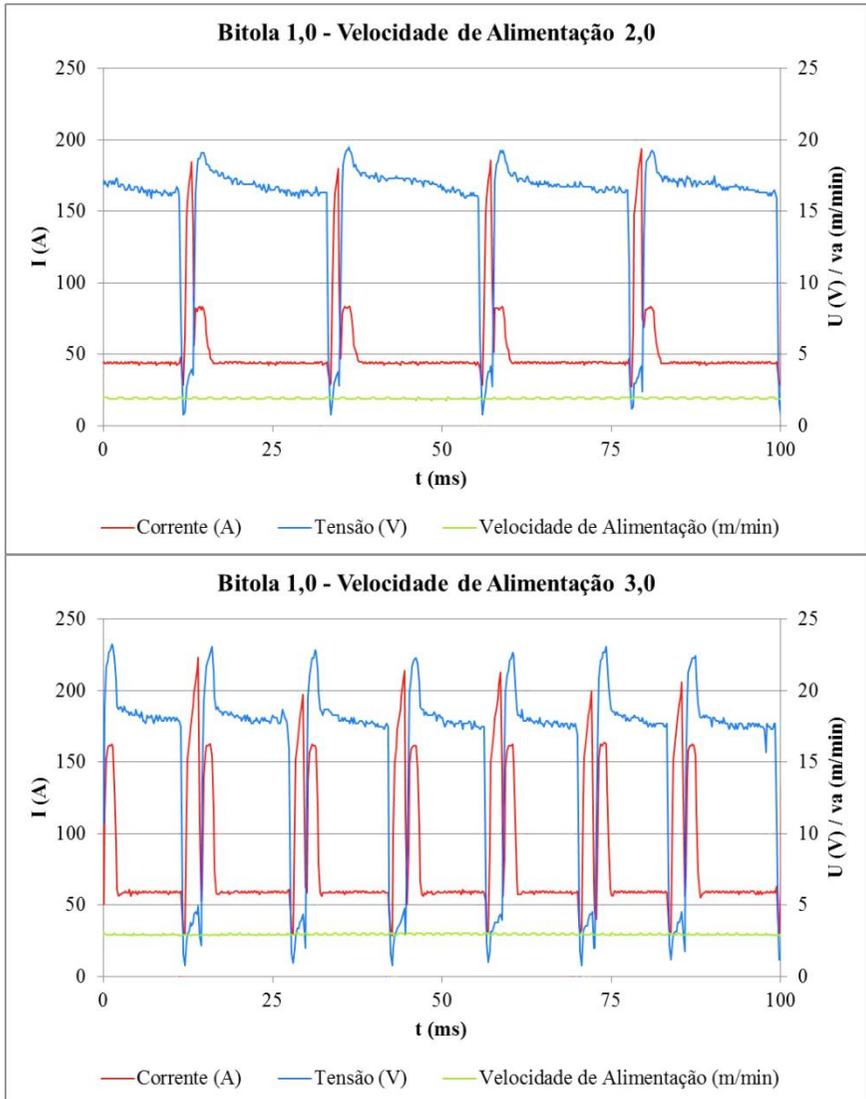
11. MATSUNAWA, A. . O. T. Role of Surface Tension in Fusion Welding (Prat 1) - Hidrostatic Effect. **Transactions of JWRI**, Osaka, 30 Sep 1982. 145-154.
12. NEMCHINSKY, V. A. Size and shape of the liquid droplet at the molten tip of an arc electrode. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 27, n. 7, p. 1433-1442, 1994. ISSN doi:10.1088/0022-3727/27/7/014.
13. SCOTTI, A. . P. V. **Soldagem MIG/MAG: Melhor Entendimento, Melhor Desenpenho**. 1ª. ed. São Paulo: Artliber, 2008.
14. LANCASTER, J. F. **The Physics of Welding**. 1ª. ed. Oxfor, New York, Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt: Pergamon Press, 1984.
15. BROOKS, R. F. Q. P. N. The surface tension of steels. **JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE**, v. 40, p. 2233 – 2238, May 2005. ISSN DOI: 10.1007/s10853-005-1939-2.
16. FUJII, H. . M. T. . U. T. . &. N. K. A new method for simultaneous measurement of surface tension and viscosity. **Journal of materials science**, v. 40, n. 9-10, p. 2161-2166, May 2005.
17. FATHI AQRA, A. A. Surface Tension of Liquid Alkali, Alkaline, and Main Group Metals: Theoretical Treatment and Relationship Investigations. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 42, n. 9, p. 2680-2684, Sep 2011. ISSN DOI: 10.1007/s11661-011-0686-z.
18. MATSUNAWA, A. Role of Surface Tension in Fusion Welding. **Transactions of JWRI**, Osaka, v. 11, n. 2, p. 145-154, Dez 1982.
19. KOU, S. Fluid flow and solidification in welding: Three decades of fundamental research at the University of Wisconsin. **Welding Journal**, Miami, v. 91, n. 11, p. 287s-302s, Nov 2012. ISSN 00432296.
20. SUBRAMANIAM, S. . W. D. R. Effect of Shield Gas Composition on Surface Tension of Steel Droplets in a Gas-Metal-Arc Welding Arc. **Metallurgical and Materials Trasactions B**, 32B, Apr 2001. 313-318.

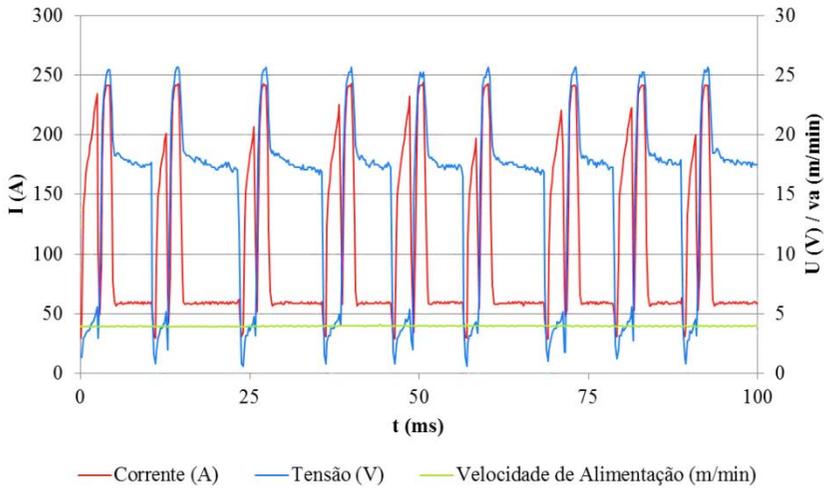
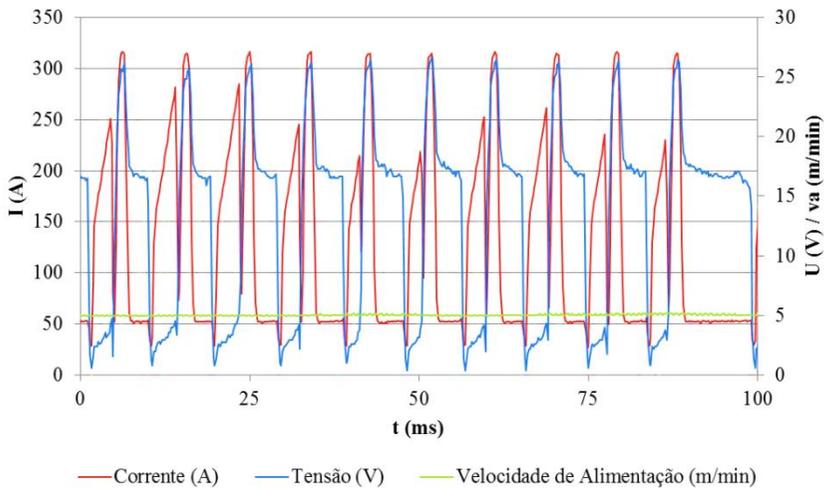
21. AMSON, J. C. Lorentz force in the molten tip of an arc electrode. **BRIT. J. APPL. PHYS.**, Mar 1965. 1169 - 1179.
22. CHOI, S. K. E. A. Dynamic simulation of metal transfer in GMAW - Part 2: Short-Circuit Transfer Mode. **Welding Journal**, Jan 1998. 45s - 51s.
23. CUIURI, D. . N. J. . C. C. D. New Approaches to Controlling Unstable Gas Metal Arc Welding. **Australasian Welding**, 47, 2002. 39-47.
24. CRAMER, H.; BAUM, L.; DUDZIAK, M. Prozesse nach Maß: Überblick über moderne Lichtbogenprozesse und deren Werkstoffübergänge beim Metall-Schutzgasschweißen, v. 64, p. 190-198, Mai 2012.
25. DUTRA, J. C. MIG/MAG - Transferência Metálica por Curto-Circuito - Fontes de Soldagem Versus Gases do Arco. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 13, p. 19-24, Jan/Mar 2008. ISSN 1.
26. NORRISH, J. . C. D. The controlled short circuit GMAW process: A tutorial. **Journal of Manufacturing Processes**, Set 2013.
27. UEYAMA, T. Welding power sources. **Welding International**, Osaka, 24, n. 9, Jul 2010. 699-705.
28. KAH P., S. R. . M. J. Advanced gas metal arc welding processes. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 67, n. 1-4, p. 655-674, Jul 2013. ISSN DOI 10.1007/s00170-012-4513-5.
29. OKUYAMA, M. SAP 4.0. **IMC SOLDAGEM**. Disponível em: <[http://www.imc-soldagem.com.br/sap\\_4.html](http://www.imc-soldagem.com.br/sap_4.html)>. Acesso em: 11 fev. 2014.
30. Y4-S2 Specifications. **ID VISION**. Disponível em: <<http://www.idtvision.com/imaging/y4.php?show=1>>. Acesso em: 11 fev. 2014.

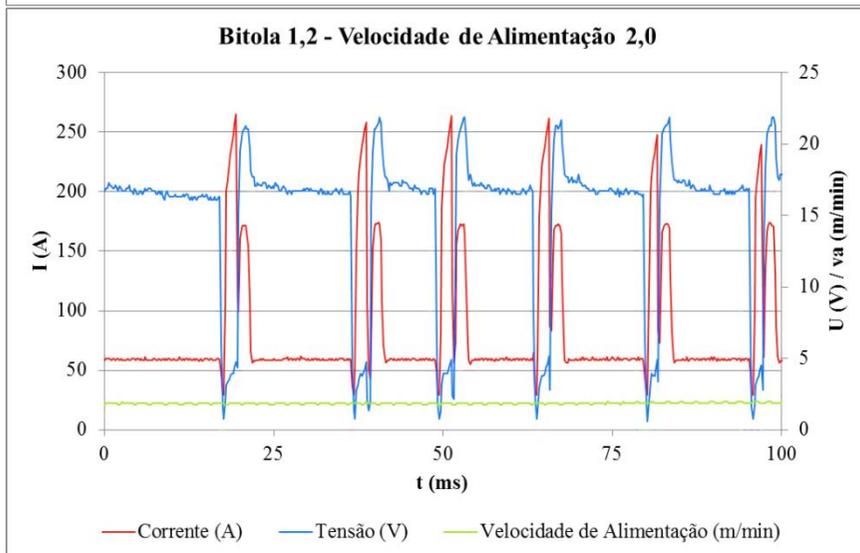
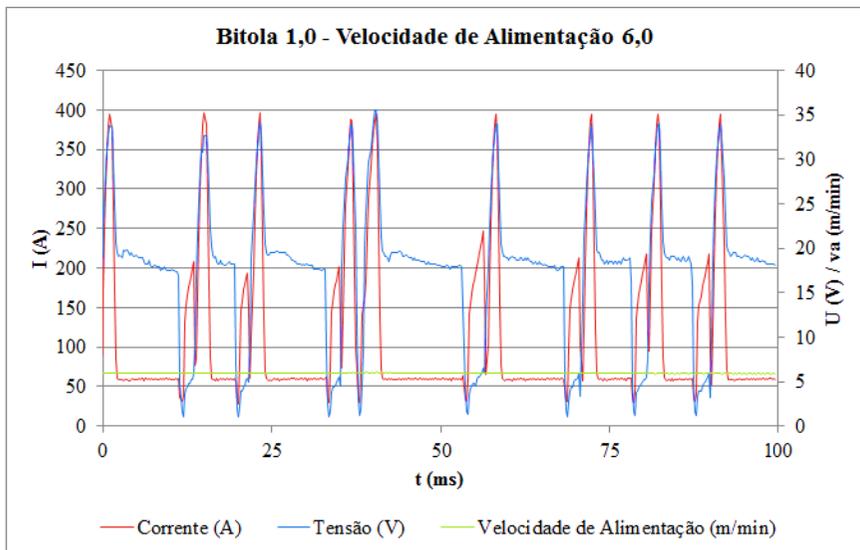
31. SYSTEMS SOLUTIONS. **IDT VISON**. Disponível em: <<http://www.idtvision.com/solutions/data.php>>. Acesso em: 11 fev. 2014.
32. OKUYAMA, M. TC 1. **IMC SOLDAGEM**. Disponível em: <[http://www.imc-soldagem.com.br/tc\\_1.html](http://www.imc-soldagem.com.br/tc_1.html)>. Acesso em: 11 fev. 2014.
33. LINCOLN Electric. **Advanced Process Welders**, 2014. Disponível em: <<http://www.lincolnelectric.com/en-us/Equipment/Pages/product.aspx?product=K2203-1>>. Acesso em: 17 fev. 2014.
34. PIPEPRO® Welding System. **Miller Welds**, 2014. Disponível em: <[http://www.millerwelds.com/products/multiprocess/pipepro\\_welding\\_system/](http://www.millerwelds.com/products/multiprocess/pipepro_welding_system/)>. Acesso em: 17 fev. 2014.
35. NADZAM, J. E. A. **Gas Metal Arc Welding Guidelines**. [S.l.].
36. DIRENE FILHO, H. **Relatório Interno - Avaliação dos diferentes programas para o processo STT**. UFSC - LABSOLDA. Florianópolis, p. 5p. 2012.
37. DERUNTZ, B. D. Assessing the Benefits of Surface Tension Transfer Welding to Industry. **Journal of Industri Technology** , v. 19, p. 2 - 8, Aug 2003.
38. STAVA, E. K. Waveform Control Speeds Root Pass. **Welding Design & Fabrication**, v. 74, n. 2, p. 39-41, FEV 2001. ISSN 4150574.
39. DIRENE FILHO, H. . S. R. H. G.; DUTRA, J. C. Comparação do Processo MIG/MAG em Transferência por Curto-Circuito com Controle de Corrente (CCC) com o Processo STT na Soldagem de Passes de Raiz em Dutos. **Conjuntura & Informação**, v. 4, p. 3-16, Dez 2013.
40. DUTRA, J. C. . S. R. H. G. . M. C. Características de Fusão e Potência de Soldagem com a Transferência MIG - CMT versus MIG convencional para Alumínio 5183. **Soldagem e Inspeção** , São Paulo, v. 18, p. 12-18, Jan/Mar 2013.

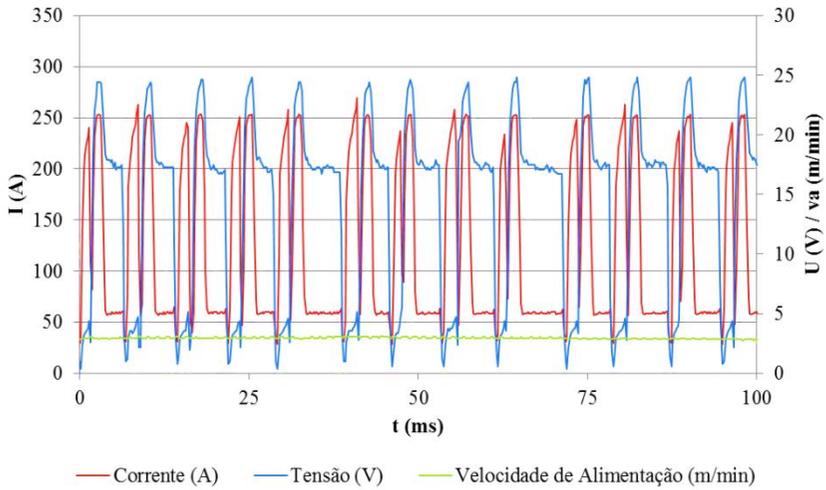
41. HSU, C. **Heat Input Comparison of STT vs. Short-Circuiting and Pulsed GMAW vs. CV Processes.** Trends in Welding Research 2002: Proceedings of the 6th International Conference (ASM International). [S.l.]: [s.n.]. 2003. p. 369-374.
42. **Miller Welds.** Disponível em: <[http://www.millerwelds.com/about/news\\_releases/2004\\_archive/articles82.html](http://www.millerwelds.com/about/news_releases/2004_archive/articles82.html)>. Acesso em: 7 Fev 2014.
43. ELETRIC, M. Manual do Usuário: PipePro 450 RFC, Nov 2008. ISSN OM-221 771N/bpg. Disponível em: <[https://www.millerwelds.com/pdf/spec\\_sheets/DC8-0.pdf](https://www.millerwelds.com/pdf/spec_sheets/DC8-0.pdf)>. Acesso em: 17 fev. 2014.
44. MARQUES, C. **Prospecções da Natureza Física da Soldagem MIG Automática de Ligas de Alumínio.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, v. Dissertação de Mestrado, 2013.

**APÊNDICE A – OSCILOGRAMAS DE TENSÃO E CORRENTE DE SOLDAGEM E VELOCIDADE DE ARAME PARA OS PROGRAMAS SINÉRGICOS DO PROCESSO CCC**



**Bitola 1,0 - Velocidade de Alimentação 4,0****Bitola 1,0 - Velocidade de Alimentação 5,0**



**Bitola 1,2 - Velocidade de Alimentação 3,0****Bitola 1,2 - Velocidade de Alimentação 4,0**