

DAS Departamento de Automação e Sistemas
CTC **Centro Tecnológico**
UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

**Controle e Atuação do Sistema de
Movimentação Dinâmica de Arame em Processos de
Soldagem a Arco**

*Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a aprovação na disciplina
DAS 5511: Projeto de Fim de Curso*

Arthur Gondim Rodrigues

Florianópolis, agosto de 2016

Banca Examinadora:

Régis Henrique Gonçalves e Silva

Orientador na Empresa

Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva

Orientador no Curso

Prof. José Dolores Vergara Dietrich

Avaliador

Arthur Sady Cordeiro Rossett

Ramon Diogo Gondim Miaja Gomes

Debatedores

Controle e Atuação do Sistema de Movimentação Dinâmica de Arame em Processos de Soldagem a Arco

Arthur Gondim Rodrigues

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina
DAS5511: Projeto de Fim de Curso
e aprovada na sua forma final pelo
Curso de Engenharia de Controle e Automação

Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva

Assinatura do Orientador

Resumo

Os processos de soldagem estão inseridos no cotidiano das mais variadas indústrias, dentre elas a indústria de petróleo e gás. A união de ligas de alumínio e ligas de aço é largamente utilizada para os mais diversos objetivos, desde a construção de dutos até estruturas para plataformas. Nesse contexto, a automação e o desenvolvimento de novas técnicas de soldagem se tornam cada vez mais interessantes para o mercado brasileiro. O LABSOLDA atua em pesquisa e desenvolvimento alinhados a esse objetivo. Este trabalho mostra uma alternativa ao clássico MIG/MAG convencional que, apesar de limitado, é bastante utilizado na indústria. Essa alternativa é a inserção do controle de corrente e controle de alimentação de arame junto à poça de fusão em transferências metálicas. Baseado nas versões comerciais de modernos processos de soldagem, mais especificamente a versão CMT (*Cold Metal Transfer*), esse trabalho propõe a utilização do movimento controlado de recuo de arame em processos MIG/MAG. Essa técnica, aqui chamada de alimentação dinâmica de arame, auxilia na soldagem pela transferência de metal por tensão superficial e pelos baixos índices de energia na etapa de curto-circuito, o que reduz drasticamente a formação de respingos. Foi construído um protótipo que permite a alimentação dinâmica, utilizando, para isso, um servomotor de elevada resposta dinâmica, foi estabelecida uma estratégia de controle condizente com o processo em questão e, por fim, foram realizados diversos ensaios de modo a estudar o resultado da aplicação da técnica em ligas de alumínio e aço.

Palavras-chave: Automação da soldagem, *Cold Metal Transfer*, CMT, Alimentação dinâmica de arame, Acionamentos elétricos.

Abstract

The welding processes are embedded on daily basis of the most varied industries, among them the oil and gas industry. The combination of aluminum alloys and steel alloys are widely used for different purposes, from building pipelines to structures for platforms. In this context, the automation and the development of new welding techniques become increasingly interesting for the Brazilian market. The LABSOLDA works in research and development aligned with this goal. This work shows an alternative for the classic conventional SMAW that, although limited, is widely used in the industry. This alternative is the combination of current control and wire feed control in the molten pool in metal transfers. Based on commercial versions of modern welding processes, specifically the version CMT (Cold Metal Transfer), this paper proposes the use of the controlled movement of wire retreat in SMAW processes. This technique, here called dynamic wire feeding, assists in the welding by transferring metal through surface tension and by low energy levels in the short-circuit stage, which drastically reduces the formation of spatter. A prototype that enables dynamic wire feed was built, a matching control strategy to the procedure has been established and, finally, various tests were performed to study the effect of the technical application in aluminum and steel alloys.

Keywords: Welding automation, *Cold Metal Transfer*, CMT, Dynamic wire feed, electric drives.

Sumário

Capítulo 1: Introdução	07
1.1 Contextualização	07
1.2 Objetivos	09
1.3 Estrutura do texto	09
Capítulo 2: Fundamentação Teórica dos Processos de Soldagem Estudados	11
2.1 O Processo MIG/MAG	11
2.2 MIG/MAG Convencional	14
2.3 MIG/MAG Curto Circuito Controlado - CCC	16
2.4 Cold Metal Transfer - CMT	19
2.5 Resumo do Capítulo	24
Capítulo 3: Sistemas de Acionamento	25
3.1 Motor DC com escovas	25
3.2 Motor de Passo	27
3.3 Servomotor AC	29
3.4 Teste sem Carga	30
3.5 Teste com Carga	35
3.6 Detalhamento do acionamento escolhido	38
3.7 Resumo do Capítulo	40
Capítulo 4: Montagem do Protótipo, Equipamentos e Periféricos de Soldagem	41
4.1 Montagem do Protótipo	41
4.2 Equipamentos e Periféricos de Soldagem	43
4.3 Resumo do Capítulo	47

Capítulo 5: Controle do Processo	48
5.1 Controle das Etapas de Soldagem	48
5.2 Sincronismo do Controle das Etapas de Soldagem com a Alimentação Secundária	54
5.3 Resumo do Capítulo	55
Capítulo 6: Resultados Obtidos	56
6.1 Modos de Controle	56
6.2 Etapas de Soldagem	58
6.3 Proteções do Controle	60
6.4 Cordões de Solda	62
6.5 Detalhamento da Transferência Metálica	65
Capítulo 7: Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros	67
Bibliografia	69

Capítulo 1: Introdução

1.1. Contextualização

A soldagem tem um papel de destaque dentro dos setores naval e petrolífero compondo o processo de fabricação e manutenção. Nesses setores, a utilização de ligas de aço é bastante tradicional devido às propriedades mecânicas a elas conferidas. Pode-se destacar a construção de tubulações, estruturas de sustentação, tanques e torres para os mais variados usos no processo industrial. Estas estruturas normalmente são construídas e montadas em partes, que são unidas entre si pelos mais variados processos, sendo o de maior destaque a soldagem.

Outro material que pode-se destacar é o alumínio, material base para a formação de diversas ligas. Estas ligas vêm ocupando cada vez mais espaço nos setores em questão devido a algumas de suas características, tais como a alta resistência à corrosão, grande capacidade de absorver impactos e boa relação peso-resistência mecânica, atuando na redução do peso do equipamento e consequentemente facilitando seu manuseio, manutenção, montagem e transporte. Pode-se encontrar ligas de alumínio sendo utilizadas em equipamentos e estruturas de perfuração, reservatórios de óleo e seus produtos, torres, condensadores, refrigeradores, construções gerais em plataformas e navios-sonda como estruturas para heliportos, escadarias, acomodações para a tripulação, entre outros.

Dada a importância desses materiais, o seguimento de trabalhos voltados ao desenvolvimento de processos de soldagem que podem ser aplicados para união tanto de ligas de aço como ligas de alumínio se torna essencial. Os avanços tecnológicos permitiram a evolução de equipamentos e processos variantes dos clássicos TIG e MIG/MAG, entretanto as variantes modernas ainda não são muito difundidas no segmento industrial.

Os métodos de soldagem para a união de metais mais utilizados na indústria petrolífera são [1]:

- Eletrodo Revestido (SMAW);
- Tungsten Inert Gas (TIG);
- Metal Inert/Active Gas (MIG/MAG);
- Soldagem por arco submerso (SAW);

Devido a sua facilidade de operação, manuseio e versatilidade o processo de soldagem com eletrodo revestido ainda é o mais utilizado. Assim, a qualidade da solda está fortemente relacionada com a habilidade manual do soldador. A presença de uma operação manual, neste caso, é um indicativo de baixa produtividade e a aplicação de modernas técnicas automáticas e/ou semiautomáticas de soldagem contribui para a reversão desse quadro. Além do aumento da produtividade, melhor qualidade nos cordões, repetibilidade, menor incidência de defeitos e descontinuidades, aplicações automatizadas diminuem a necessidade de retrabalhos e garantem ao processo maior robustez de execução. [2]

Nesse sentido, o desenvolvimento de tecnologias nacionais de automação da soldagem é de grande interesse para a indústria de petróleo e gás que se beneficia com:

- Aumento da produtividade e qualidade na construção de equipamentos, estruturas e dutos *onshore* e *offshore* para o transporte de petróleo, gás e derivados;
- Aumento da competitividade na cadeia global do Petróleo e Gás;
- Redução dos custos, com um rápido retorno de investimento.
- Uma menor dependência da mão de obra de soldadores, cuja experiência é determinante na qualidade do serviço executado;

Ao longo das últimas décadas surgiram variantes de processos de soldagem que se beneficiam com técnicas de avanço e recuo de arame, obtendo resultados promissores. A dificuldade associada a essa movimentação, aqui chamada de alimentação dinâmica do arame, é, principalmente, o fato de ser necessária a utilização de frequências de oscilação compatíveis com uma transferência por curto-circuito.

É baseado nessa técnica de alimentação dinâmica que o presente trabalho se desenvolve. Com os resultados espera-se a aplicabilidade da técnica para soldagem de ligas de alumínio e ligas de aço utilizando variações dos processos MIG/MAG.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Como ferramenta para avaliação das reais influências da movimentação dinâmica do arame sobre os resultados da solda, o presente trabalho tem por objetivo principal o estudo e implementação de um sistema de alimentação dinâmica de arame, que permita a realização de ensaios em diferentes versões dos processos MIG/MAG.

1.2.2. Objetivos específicos

- Avaliar três diferentes tecnologias de motores quanto a resposta de movimentação em função da inversão de movimento requerida;
- Implementar o sincronismo do movimento do arame com os parâmetros elétricos do arco;
- Definir algoritmo de controle para integração entre os dois motores tracionadores de arame;

1.3. Estrutura do texto

A estruturação deste trabalho se faz em forma de sete capítulos, sendo esta introdução o capítulo de número 1.

O capítulo 2 aborda a fundamentação teórica dos processos de soldagem estudados que serviram de base para o desenvolvimento do trabalho. Trata das tecnologias existentes e seu funcionamento, com destaque para a versão comercial CMT.

O capítulo 3 expõe os diferentes sistemas de acionamentos estudados para compor o protótipo, descrevendo o funcionamento básico de cada um e analisando os resultados dos experimentos e medições que levaram à escolha do uso de um servomotor AC.

O capítulo 4 mostra como o protótipo foi montado, quais as peças utilizadas e suas funções. Em seguida são apresentados e descritos os equipamentos utilizados no processo adicionalmente ao protótipo alimentador de arame.

No capítulo 5 são descritas as diferentes etapas utilizadas no funcionamento do processo de soldagem e como foi realizado o controle das mesmas.

No capítulo 6 são expostos os resultados obtidos juntamente com mudanças propostas no sentido de melhorá-los.

Por fim, o capítulo 7 apresenta as conclusões gerais sobre o trabalho e traz as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2: Fundamentação Teórica dos Processos de Soldagem Estudados

Neste capítulo serão detalhados os processos de soldagem que serviram de base para o desenvolvimento do trabalho. Partindo-se do processo de MIG/MAG convencional, apresentou-se como suas vertentes evoluíram com o tempo até culminar em um dos equipamentos mais modernos atualmente em termos de soldagem MIG/MAG: o CMT.

2.1. O Processo MIG/MAG

MIG/MAG é um processo de soldagem utilizado para união de materiais metálicos, por meio da fusão desses materiais a partir do estabelecimento de um arco elétrico entre a peça e eletrodo. Este, por sua vez, é consumível e alimentado por um sistema mecânico ou adicionado manualmente por um soldador. O processo tem sua sigla originária das palavras inglesas *Metal Inert Gas* (MIG) e *Metal Active Gas* (MAG) nome referente a caracterização pelo uso de gases, ou mistura de gases, inertes e/ou ativos para proteger a poça de fusão e a região adjacente a ela. Os gases comumente utilizados são o argônio, como gás inerte, e o dióxido de carbono como gás ativo.

A utilização de gases nesse tipo de processo se dá com o objetivo principal de expulsar os gases atmosféricos da região da solda e evitar a contaminação da poça de fusão. A contaminação é causada principalmente pelo nitrogênio (N₂), oxigênio (O₂) e vapor d'água (H₂O) presentes na atmosfera. A denominação de gases ativos e inertes se dá pelo modo como esses gases interagem com a poça de fusão. O gás é dito inerte quando não há interação química e é dito ativo quando o gás se decompõem no período de arco, gerando uma atmosfera ativa, com funções relacionadas à soldabilidade, penetração e pequena participação na composição química da poça de fusão. [4]

Atualmente a utilização de argônio puro é restrita a poucas aplicações, como por exemplo a soldagem do alumínio, como aconteceu nos primórdios do surgimento deste processo. Em todos os outros casos, mesmo para a soldagem de aços inoxidáveis, a presença de certa quantidade, mesmo que muito pequena de um gás ativo proporciona resultados benéficos, principalmente para a estabilidade do arco. Por isso, as designações singelas de MIG ou de MAG ficam difíceis de serem aplicadas em seus sentidos restritos. Por esta razão, é comum aparecerem os dois termos juntos, separados por um hífen ou uma barra (Processo MIG-MAG). Os americanos se livraram desta problemática designativa pela adoção de um nome genérico para o processo, “Gas Metal Arc Welding”, ou simplesmente “GMAW”, o que em português significa, “soldagem a arco com eletrodo metálico sob proteção de gás”. [3]

A Figura 1 apresenta um esquemático detalhando a região de aplicação da solda.

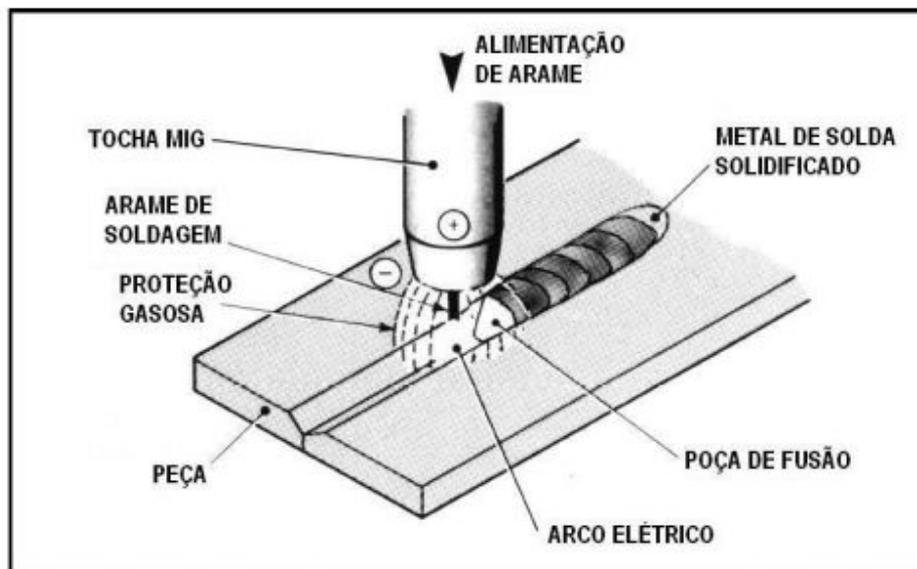


Figura 1 - Processo básico de soldagem MIG/MAG [4].

O equipamento necessário para a soldagem MIG/MAG consiste de uma pistola (ou tocha) de soldagem, fonte de energia, um sistema de suprimento de gás e um sistema alimentador do arame-eletrodo. Em função do ciclo de trabalho e do nível de corrente utilizado, surge também a necessidade do resfriamento a água

para a pistola de soldagem. Estes equipamentos podem ser observados na Figura 2, com exceção da unidade de refrigeração.

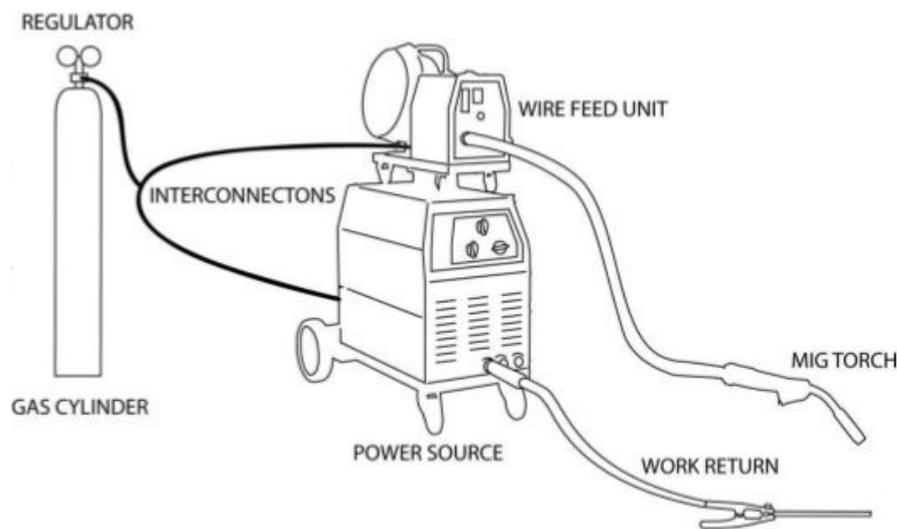


Figura 2 - Configuração básica de um equipamento de soldagem para o processo MIG/MAG.

Alguns pontos vantajosos que podem-se levantar sobre a utilização de processos MIG/MAG são:

- Possibilidade de automação total do processo, resultando em produtividade mais alta;
- Possibilidade de uso para diversos tipos de metais e ligas;
- Possibilidade de uso em todas posições de soldagem;
- Não exige altos níveis de habilidade do soldador;
- Possibilidade de uso de material de adição na forma de arame, o que permite um tempo de arco maior contribuindo para uma maior produtividade;

Em contrapartida, podem-se citar as seguintes desvantagens:

- Utilização de equipamentos mais complicados e mais caros em relação a outros processos;
- Pouca portabilidade dos equipamentos utilizados;
- Suscetibilidade à falta de fusão utilizando o modo convencional com transferência por curto-circuito;

2.2. MIG/MAG Convencional

O processo de soldagem MIG/MAG convencional é o que utiliza a forma mais simples de equipamento. Neste caso, a fonte de soldagem é do tipo tensão constante e, conseqüentemente, a corrente que circula no processo é uma variável dependente, fundamentalmente, da velocidade de alimentação de arame e das propriedades físicas e químicas do mesmo. Dessa forma, os parâmetros configurados pelo usuário se limitam à tensão da fonte, velocidade de arame e vazão de gás.

Na configuração convencional do processo MIG/MAG, o mecanismo de transferência de material do arame para a peça pode ser dividido em quatro etapas, conforme a Figura 3.

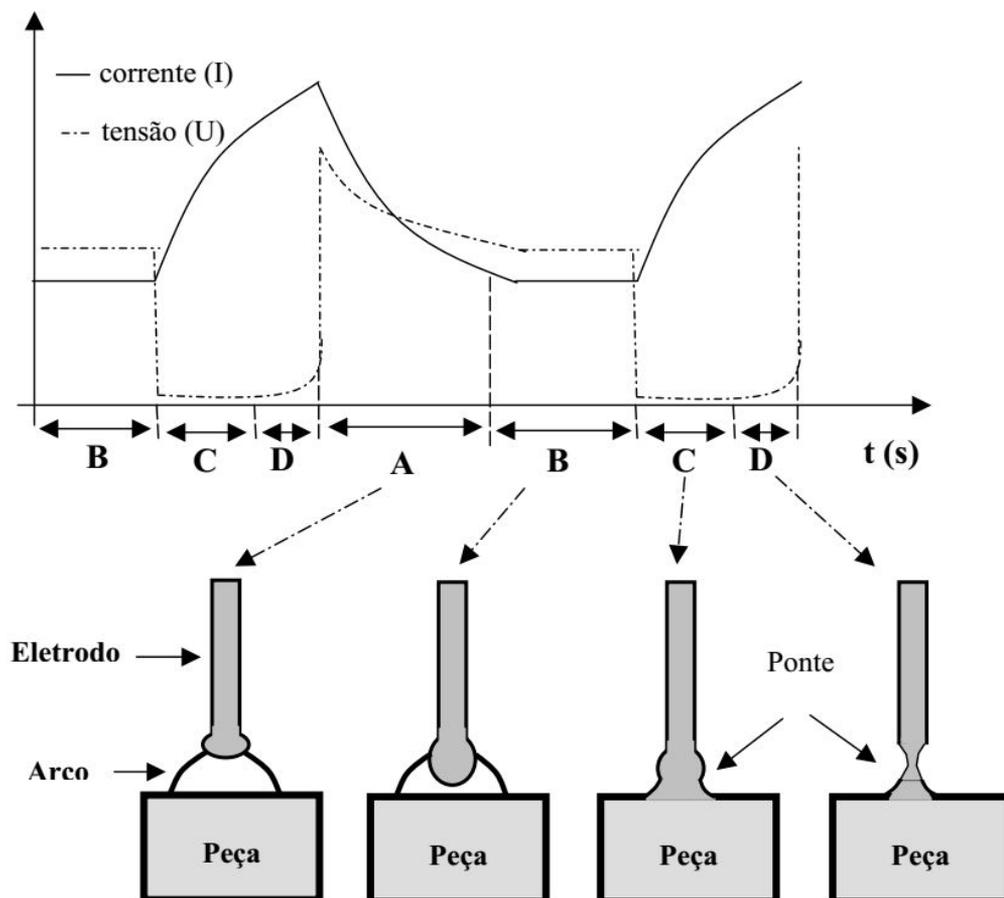


Figura 3 - Etapas da transferência metálica no processo MIG/MAG convencional [5].

Na primeira etapa, etapa A, o eletrodo se encontra no ponto mais afastado da poça de fusão e o arco elétrico possui o maior valor energético, onde a corrente e a tensão atingem seus pontos máximos. O valor da corrente é reduzido exponencialmente a fim de conduzir a tensão ao valor de referência (valor de tensão ajustado para soldagem), a uma taxa de decrescimento determinada através da indutância da fonte de soldagem. Essa etapa é responsável pela maior parcela na formação da gota metálica, produto da elevada taxa de fusão do arame. [5]

Na etapa B, a tensão tende a se estabilizar no valor de referência. Durante este período, a gota continua a aumentar seu volume, porém a uma taxa reduzida ocasionada pela diminuição do nível energético disponibilizado pela fonte.

A etapa C marca o início do curto-circuito. Neste momento, parte da gota é transferida à poça por tensão superficial. O contato da gota metálica com a poça de fusão faz com que o valor da corrente se eleve, em uma tentativa da fonte reestabelecer o valor de tensão de referência.

Na etapa D é iniciado o processo de constrição da parte restante da gota que forma a ponte de ligação entre o eletrodo e a peça. Uma das principais forças que atuam nesse momento é a eletromagnética (efeito “*pinch*”), sendo sua intensidade tanto maior quando maior o valor da corrente e menor a espessura da ponte. Como a corrente é cada vez maior, a força também acompanha esse aumento, reduzindo cada vez mais, o diâmetro da ponte. Com a redução da espessura da ponte, a força aumenta ainda mais. Isso causa uma espécie de realimentação, acelerando o processo de constrição [5]. Ao final da etapa D tem-se início um novo ciclo do processo.

Analisando o funcionamento do processo de MIG/MAG convencional, pode-se perceber a relação entre a regularidade da transferência metálica e a velocidade de alimentação de arame, ou seja, a taxa em que o eletrodo é introduzido na poça de fusão. Por isso se faz necessário uma boa regulagem dos parâmetros de entrada.

O maior limitante do modo convencional da soldagem MIG/MAG é o fato de não poder atuar diretamente na corrente de soldagem, que é a variável de maior influência no resultado da solda. Assim foram desenvolvidos métodos que visam um

melhor controle dessa variável na etapa de curto-circuito, dando origem a processos como o Curto Circuito Controlado (CCC).

2.3. MIG/MAG Curto Circuito Controlado - CCC

Inicialmente, o desenvolvimento de novas versões de processos de soldagem buscavam usufruir das vantagens de um sistema com transferência por curto-circuito, tais como menor aporte térmico e menor nível de tensões residuais, solda fora de posição, entre outros. Objetivava-se também eliminar ou reduzir alguns inconvenientes do processo convencional, como o excesso de respingos (Figura 4), geração de fumos e irregularidade na transferência metálica [7].

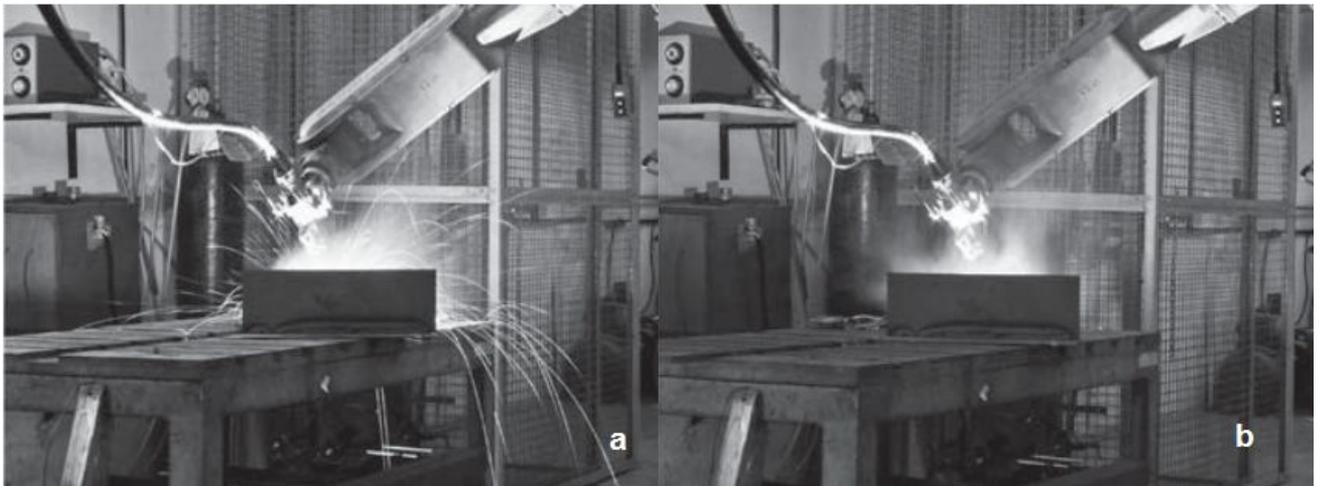


Figura 4 - Comparativo de formação de respingos entre procedimentos MIG/MAG tradicional (a) e CCC (b). [6]

O princípio de funcionamento, como o próprio nome sugere, baseia-se na regulação da corrente e seu controle em tempo real. Para se obter tal controle, as diferentes técnicas deste processo fazem uso de alguma estratégia de monitoração e realimentação, de forma que a fonte possa responder à condição instantânea de operação de acordo com o que foi previamente configurado.

Existem diferentes variações entre os fabricantes com relação à forma de onda fornecida pela fonte de corrente, aqui será explicada a versão desenvolvida

pela empresa Lincoln Electric, denominada *Surface Tension Transfer* (STT), em português, Transferência por Tensão Superficial.

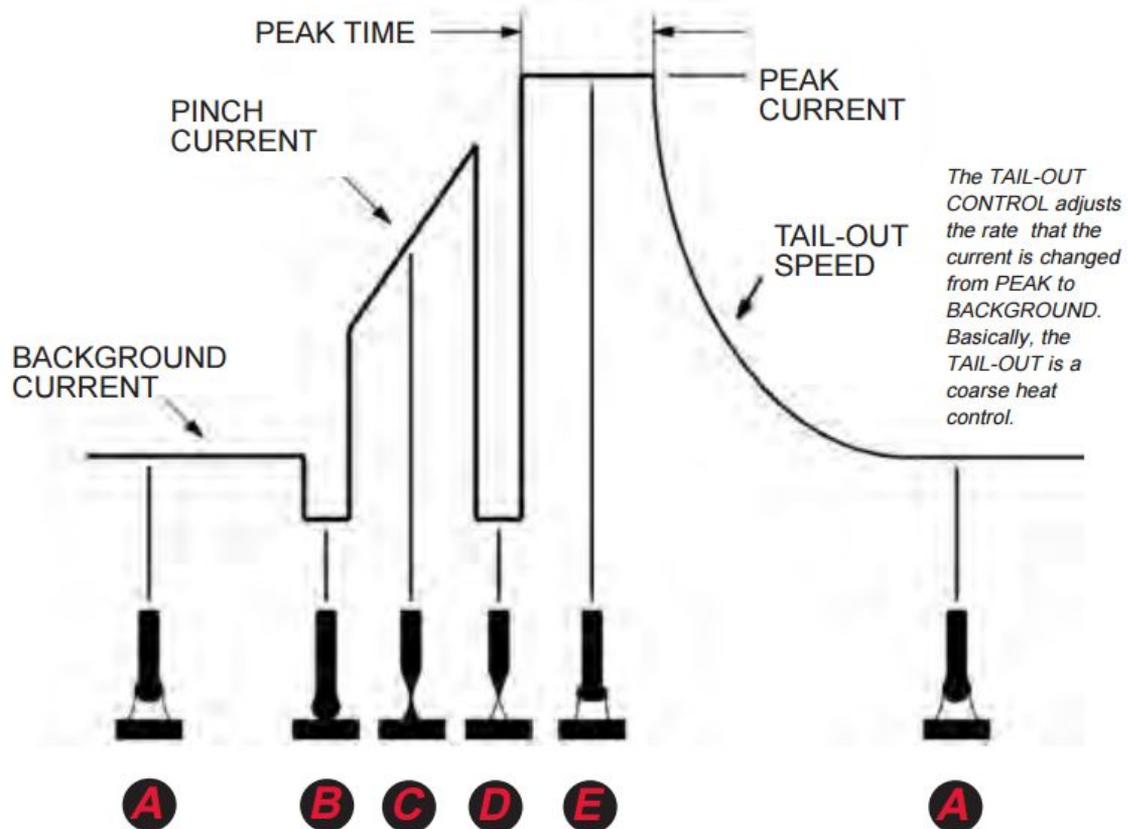


Figura 5 - Forma de onda apresentada pela empresa Lincoln para a versão STT [8].

A primeira fase, indicada na Figura 5 pela letra A, é a fase de arco aberto. A corrente é mantida em um valor baixo, sendo responsável pela manutenção do arco elétrico e fornecimento de energia para formação da gota. Esta etapa é finalizada no momento em que a gota toca a poça de fusão, caracterizando o curto-circuito. Durante o período de curto-circuito o sistema se subdivide em três etapas, B, C e D.

A etapa B ocorre quando a tensão cai para um valor definido como tensão de curto-circuito. Neste momento a fonte responde de forma a reduzir a corrente, possibilitando o assentamento da gota à poça de fusão por meio da tensão superficial. Essa redução de corrente contribui para redução dos níveis de respingos fornecidos por esse método.

Em seguida, na etapa C, é gerada uma rampa de alta corrente cuja finalidade é atuar no destacamento da gota por efeito *Pinch*. Enquanto isso, o sistema calcula eletronicamente o momento que antecede a reabertura do arco e então reduz a corrente na iminência da reabertura, dando início à etapa D. Esta etapa garante que a reabertura do arco seja feita em baixos níveis de corrente, eliminando os respingos que poderiam ser gerados por “explosão” da delgada ponte metálica.

A etapa E é composta por um pulso de corrente imediatamente após a reabertura do arco. Este pulso é responsável por um momentâneo alargamento do arco, produzindo altos níveis de aquecimento, consequentemente fundindo o eletrodo, e por empurrar a poça de fusão de modo a evitar um curto-circuito prematuro. Esta fase é finalizada com o decaimento da corrente de forma exponencial, auxiliando na redução da agitação da poça, até atingir os níveis estabelecidos na etapa A, onde tem-se o reinício do ciclo.

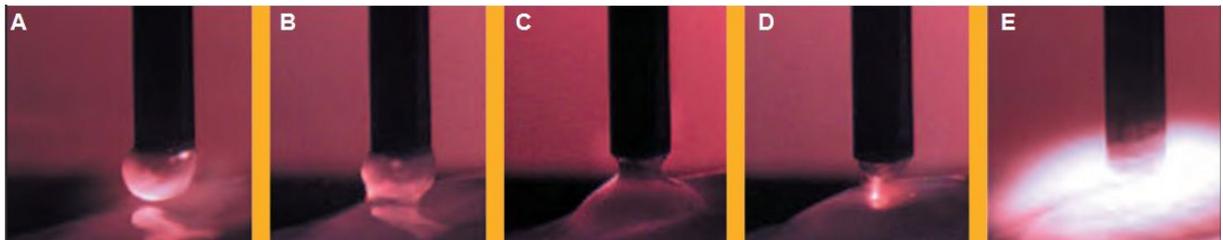


Figura 6 - Detalhes do arco nas diferentes etapas do STT [8].

A partir da análise de seu funcionamento, pode-se destacar algumas vantagens de processos com controle de corrente, como o STT, em relação ao processo MIG/MAG convencional, como por exemplo melhores taxas de fusão, melhor controle sobre a poça de fusão, baixos índices de respingos e fumos, possibilidade de utilizar variadas misturas gasosas.

O próximo passo para a continuidade dos avanços tecnológicos no ramo foi dado no sentido de controlar ainda mais a transferência metálica, atuando nas variáveis que influenciam no resultado final de soldagem. Após o sucesso no controle da corrente e das etapas envolvidas nos variados processos de soldagem, objetivou-se o controle da alimentação de arame e surgiram no mercado vertentes

com a adição desse tipo de controle, sendo o *Cold Metal Transfer* (CMT) a de maior impacto.

2.4. Cold Metal Transfer - CMT

Lançado pela empresa Fronius em 2002 [12], o *Cold Metal Transfer*, em português “Transferência Metálica Fria”, traz uma grande inovação aos processos de soldagem ao introduzir o controle direto do movimento do arame. Esse controle adiciona o movimento de recuo de arame ao processo no momento da detecção do curto-circuito, auxiliando no destacamento da gota. Esse movimento do arame, juntamente com o controle de corrente proporcionou ao CMT uma transferência metálica muito suave, com praticamente nenhum respingo e pouca geração de fumos [9]. A denominação de transferência metálica fria se dá em termos relativos de soldagem. O movimento de avanço e recuo do arame faz com que o arco elétrico seja sistematicamente descontinuado, resultando em uma alternância entre estados de “quente-frio”, dando origem ao nome do processo.

O sucesso dessa estratégia foi possível devido a modificações nos equipamentos tradicionais da soldagem MIG/MAG, principalmente na tocha e na mangueira que a alimenta. Posicionado na tocha existe um motor de alta resposta dinâmica que permite o trabalho com frequências de inversão de movimento de até 70 Hz [10]. Auxiliando o movimento de arame existe um segundo motor localizado no cabeçote de alimentação de arame na outra extremidade da mangueira. Na parte central desta mangueira existe um dispositivo chamado de *buffer* cuja função é desacoplar o movimento dos dois motores e absorver o movimento de recuo de arame, além de armazenar e fornecer a quantidade requerida instantaneamente pelo motor da tocha. Uma reprodução do equipamento necessário ao processo CMT pode ser visto na Figura 7.

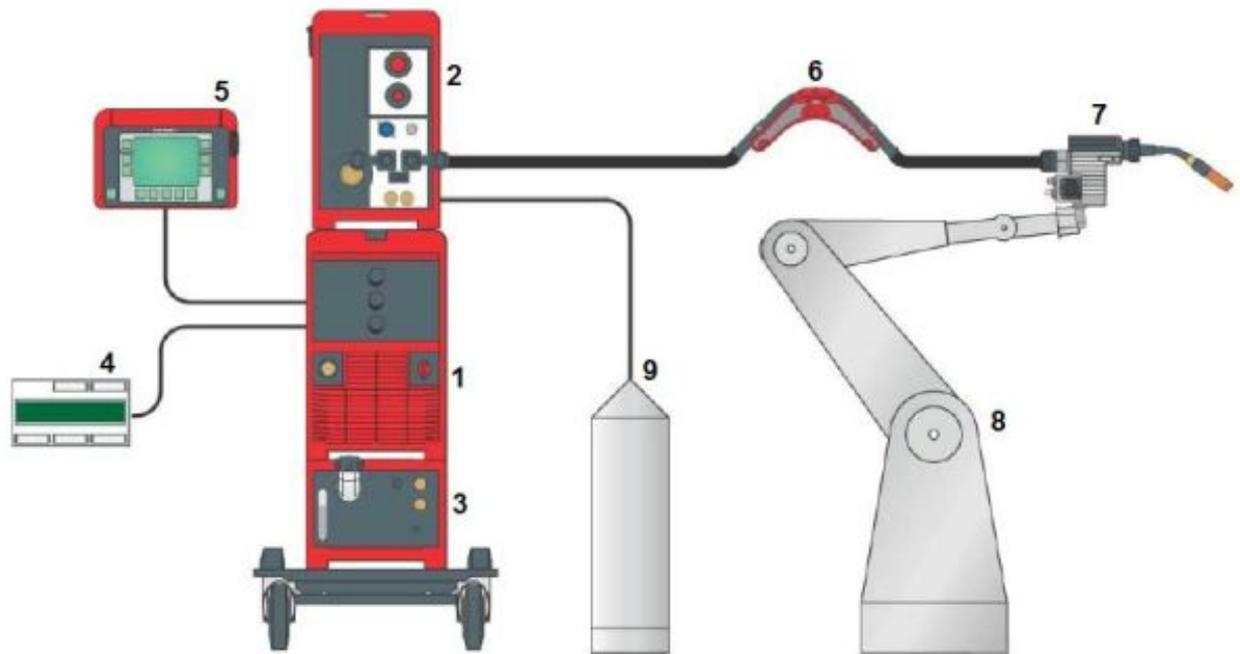


Figura 7 - Disposição dos equipamentos de um sistema CMT. 1 - Fonte de alimentação; 2 - Cabeçote alimentador; 3 - Refrigeração; 4 - Interface para robô; 5 - Unidade de controle remoto; 6 - Buffer de arame; 7 - Tocha com motor; 8 - Manipulador robótico; 9 - Gás de proteção; [10]

Da mesma forma que o processo apresentado anteriormente, a transferência metálica do CMT ocorre predominantemente por curto-circuito com controle de corrente. A descrição do funcionamento geral do processo pode ser acompanhada pela sequência de imagens e por meio do oscilograma apresentado na Figura 8. O processo tem início no ponto “a”, momento em que o arco se encontra no ponto mais afastado da poça. Durante esta fase a fonte fornece um alto pulso de corrente no intuito de formar a gota na extremidade do arame eletrodo. No intervalo entre esta etapa e a etapa “b” o arame é conduzido no sentido da poça de fusão. Em seguida, a corrente é reduzida em “b” de tal forma que, com a continuidade do avanço do arame, o curto-circuito ocorra em baixos níveis de corrente, evitando a formação de respingos e a vaporização metálica [10].

O ponto “c” identifica a iminência do curto-circuito, sendo este iniciado no ponto “d”. Neste momento, a fonte de alimentação aplica uma corrente ainda menor no sistema e o movimento do arame começa a desacelerar até o ponto “e”, onde há a inversão de sentido do mesmo.

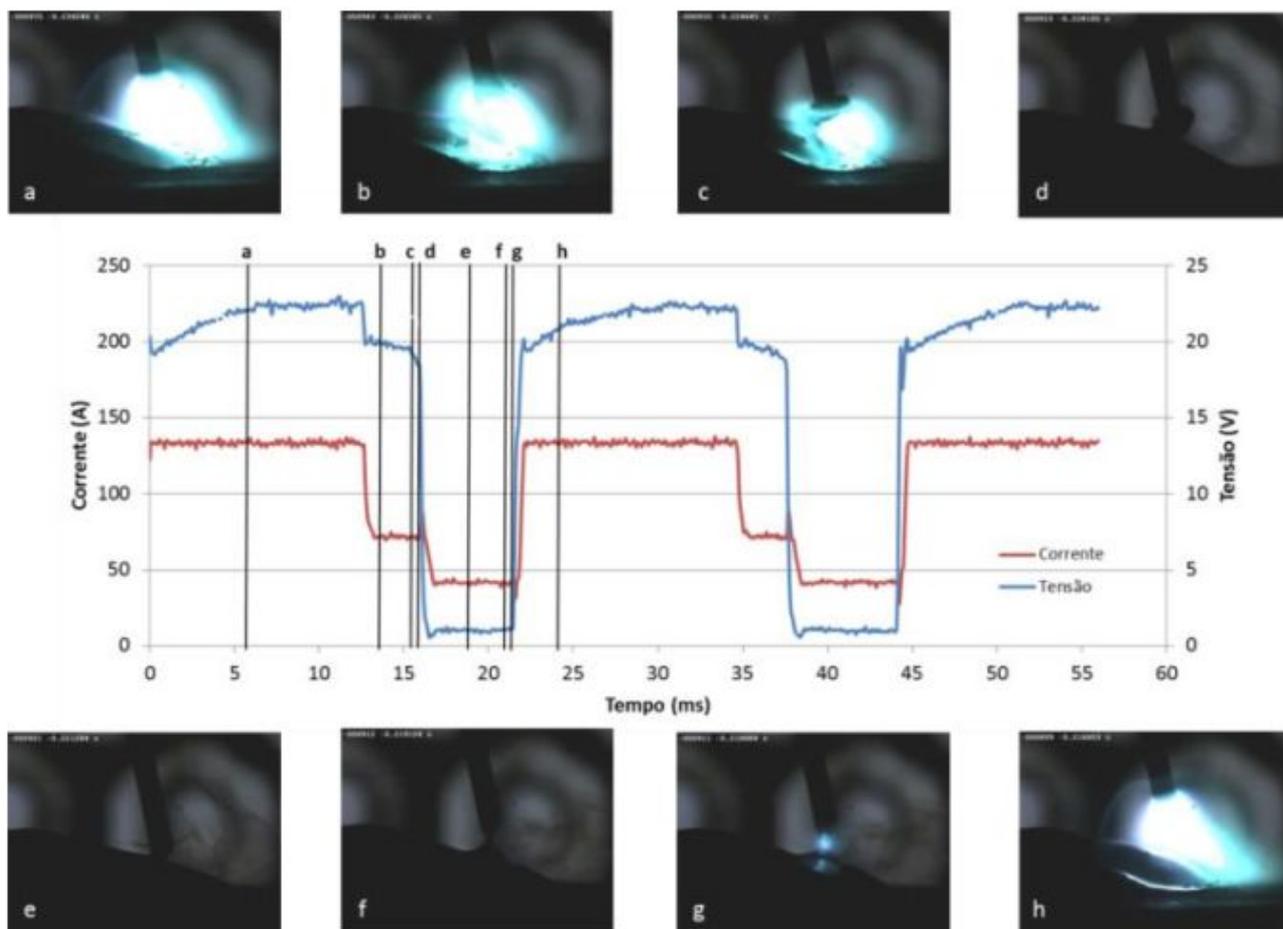


Figura 8 - Oscilograma de tensão e corrente para o modo CMT, soldagem de alumínio ER5183 [9].

O ponto “f” marca a iminência da reabertura do arco. Neste ponto pode-se observar a constricção da ponte metálica na imagem da Figura 8. Diferentemente do processo STT, essa constricção se dá, predominantemente, pelo movimento de recuo de arame em oposição à força eletromagnética para o efeito *Pinch* do processo anterior, assim, a transferência metálica se dá de forma mais suave.

No ponto “g” inicia-se a reabertura do arco e a desaceleração do movimento do arame, que continua recuando até o ponto “h” onde inverte seu sentido. Após a detecção da abertura do arco inicia-se novamente um elevado pulso de corrente, marcando o reinício do ciclo.

Além das vantagens de um processo com curto circuito controlado, o CMT tem o diferencial de ser capaz de controlar a altura média do arco independentemente da leitura do valor de tensão do processo, já que este é o

parâmetro que melhor representa o comprimento do arco. Em termos gerais, quanto mais afastado o arame da peça, maior a tensão lida pela fonte. Entretanto essa medição não é sempre confiável. Um exemplo de inadequação dessa medição acontece na presença de óxidos, impurezas e sujeira, que provocam flutuações no sinal de tensão, podendo acarretar em problemas para o sistema de controle. Kazmaier [11] mostra um exemplo por meio da Figura 9. Nesta figura, o sinal de tensão sofre uma variação devido à remoção da camada de óxidos, onde é possível verificar diferentes níveis de tensão para um mesmo comprimento de arco [9].

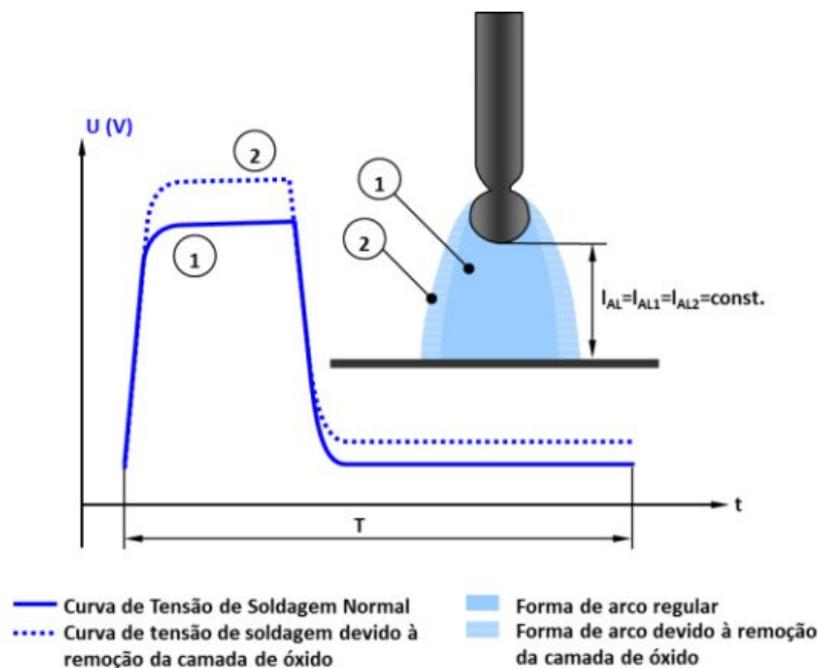


Figura 9 - Variações nos níveis de tensão devido à remoção da camada de óxido. [9]

Essa problemática associada à leitura de tensão pode ser contornada pelo modo CMT, já que a cada ciclo de transferência tem-se o contato físico do arame com a peça, o que pode ser usado como referência de altura do arco. Para entender essa situação podemos analisar a Figura 10. Na figura, o ponto de número 1 indica o contato do arame com a peça, ou seja, início do curto-circuito. Entre os pontos 1 e 2 o arame está desacelerando e a partir do ponto 2 ele inverte o sentido de movimento, dando início ao movimento de recuo e atingindo sua velocidade programada no ponto 3.

O ponto de número 4 indica o instante da reabertura do arco e início do controle de altura. A partir desse momento, o sistema de controle estabelece uma relação constante correspondente ao valor da área sob a curva de velocidade por tempo até o ponto 5, que marca a parada do motor e nova inversão de sentido de rotação. Esta área nada mais é que a integral da função de velocidade do motor da tocha, correspondente ao deslocamento efetivo do arame. Esta estratégia faz com que a altura do arco seja controlada de forma independente dos valores de tensão no arco.

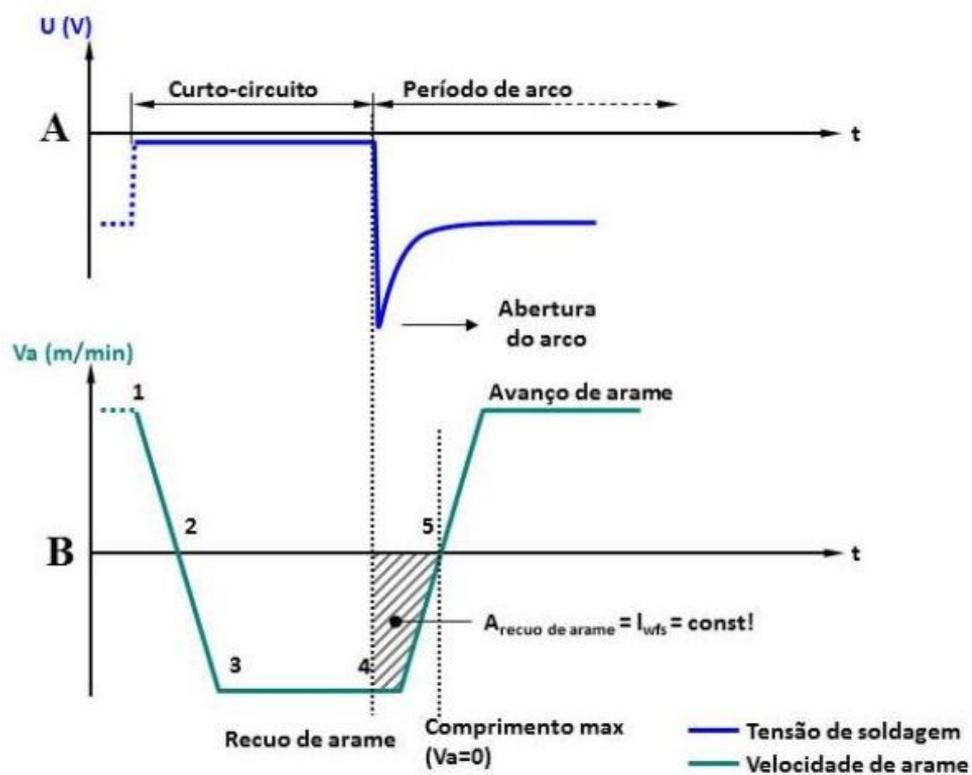


Figura 10 - Metodologia para o controle do comprimento do arco para o CMT [11].

Tendo em vista que os resultados gerados pelo modo CMT mostram que a técnica de recuo controlado de arame é benéfica ao processo de soldagem, esse processo servirá como base para o desenvolvimento deste trabalho.

2.5. Resumo do Capítulo

Este capítulo tratou dos fundamentos gerais dos processos de soldagem MIG/MAG e da evolução dos mesmos a partir da sua forma convencional, passando para a versão com controle de corrente e curto-circuito e finalizando na versão com recuo de arame, chamada CMT. Foi descrito também o equipamento básico utilizado nestes processos e as modificações que permitiram a aplicabilidade do movimento de recuo de arame na versão CMT. Levantaram-se as vantagens de cada processo e concluiu-se que atualmente a versão com movimento de recuo de arame é a que apresenta os maiores benefícios para a soldagem, assim esta servirá como base para o estudo e desenvolvimento do presente trabalho.

Capítulo 3: Sistemas de Acionamento

O grande diferencial do sistema CMT, como já mencionado anteriormente, é a adição do movimento de recuo de arame na ocorrência do curto-circuito. Este movimento só é possível devido à presença de um motor de alta resposta dinâmica integrado ao corpo da tocha. No intuito de construir um protótipo que desempenhe um comportamento semelhante ao do CMT, foi necessário estudar os diferentes tipos de acionamentos disponíveis no LABSOLDA para escolha daquele mais adequado.

Os seguintes tipos de acionamentos foram estudados e submetidos a testes com e sem carga:

- Motor DC com escovas;
- Motor de passo;
- Servomotor AC;

3.1. Motor DC com escovas

O motor DC estudado foi o modelo GM8224S017 da marca Pittman que pode ser visualizado na Figura 11.



Figura 11 - Motor DC utilizado nos estudos e testes.

O funcionamento do motor DC se baseia no princípio que um condutor elétrico imerso em um campo magnético está sujeito a uma força eletromagnética. Os principais componentes desse tipo de motor são descritos como segue:

- **Estator:** é a parte fixa do motor, contém um enrolamento que é alimentado por uma fonte de tensão contínua e é responsável pela geração do campo magnético. Em alguns casos o estator nada mais é que um ímã permanente.
- **Rotor:** é a parte girante do motor, contém um enrolamento (armadura) que é alimentado por uma fonte de tensão contínua através do comutador.
- **Comutador:** é um dispositivo mecânico conectado aos terminais das espiras da armadura que é responsável por inverter sistematicamente o sentido da corrente da armadura do rotor.

Na Figura 12 podemos observar a estrutura básica de funcionamento de um motor DC com escovas.

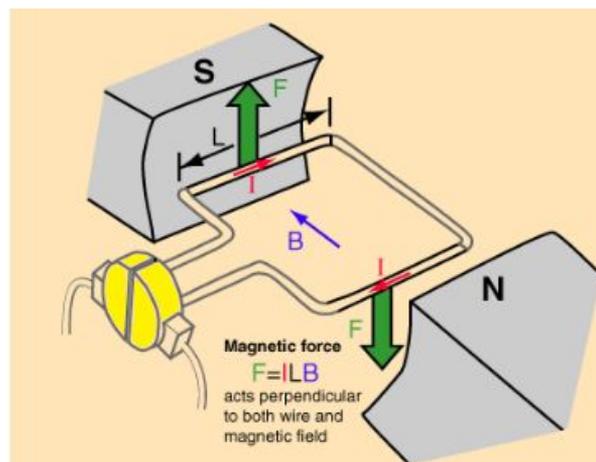


Figura 12 - Princípio básico de funcionamento do motor DC [13].

Pode-se observar que sem o mecanismo de comutação, destacado em amarelo na Figura 12, a espira iria estacionar na posição de equilíbrio verticalmente. Quando a espira passa por uma posição de equilíbrio, o comutador muda a corrente que circula na espira, alternando a polaridade da tensão nos terminais, de forma que a força resultante na espira sempre provoque um movimento no mesmo sentido.

Este tipo de motor possui a vantagem de ser muito simples, sua velocidade de rotação só depende da tensão de entrada, logo pode-se efetuar o controle do mesmo com boa precisão de velocidade.

3.2. Motor de Passo

O motor de passo estudado foi o modelo KTC-HT23-401 da marca Kalatec.

Este tipo de motor é caracterizado por suas variações angulares discretas. Os incrementos de variação angular são chamados de “passos”.



Figura 13 - Motor de passo utilizado nos estudos e testes.

O funcionamento básico do motor de passo é dado pelo uso de solenoides alinhados dois a dois que, quando energizados, atraem o rotor fazendo-o se alinhar com o eixo determinado pelos solenóides, causando assim uma pequena variação angular que é chamada de passo. A velocidade e o sentido de movimento são determinados pela forma como cada bobina é ativada (sua ordem e a velocidade entre cada ativação) [14].

A Figura 14 ilustra a posição do rotor de um motor de passo em relação às bobinas do mesmo. O deslocamento, ou passo, se dá pelo fato de o rotor ser uma estrutura magneticamente ativa que, na presença de um campo magnético nas bobinas, tende a se alinhar em sua posição mais estável. O alinhamento entre as bobinas é chamado de *half-step* ou meio passo, situação observada na Figura 14

letras “b”, “c” e “d”. Já a situação de letra “a” é denominada *full-step*, ou passo inteiro, que acontece quando o alinhamento se dá com as bobinas.

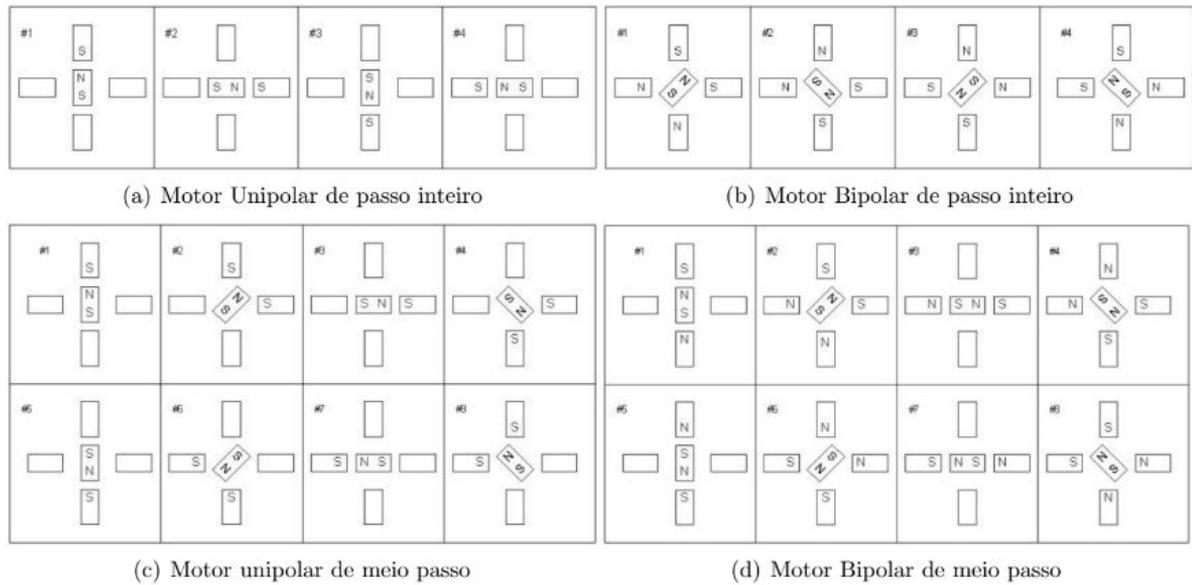


Figura 14 - Alinhamento do rotor em relação às bobinas em diferentes configurações de energização do motor de passo [14].

Como consequência do seu funcionamento, o motor de passo apresenta algumas vantagens em relação aos outros tipos de motores. A maior delas é a precisão obtida no posicionamento do eixo. Como seu passo é bem definido, o rotor sempre se deslocará em ângulos também bem definidos. Essa característica influencia no controle desse tipo de motor podendo dizer que este segue uma lógica digital, pois seu acionamento é feito através de pulsos elétricos que ativam sequencialmente suas bobinas.

Apesar dessas vantagens, os motores de passo não apresentam um bom desempenho em altas velocidades. Isso se dá porque o aumento das rotações do rotor é gerado pela diminuição do intervalo de tempo entre o acionamento de uma bobina e a seguinte. Quando esse tempo é muito pequeno ocorre a situação chamada de “perda de passos”. Nesta situação o controle do acionamento das bobinas fica impreciso e, assim, a aplicação desses motores fica comprometida.

3.3. Servomotor AC

Foram avaliados dois modelos de servomotores da marca Panasonic, o primeiro deles de 200 W de potência, MSMD022P1T, e o segundo de 100 W, modelo MSMD012P1T.



Figura 15 - Servomotor utilizado nos estudos e testes.

Os servomotores apresentam um leque de características que os distinguem dos demais tipos de motores. Eles podem apresentar uma elevada dinâmica, isto é, funcionam a várias velocidades com torque constante. Possuem também um rigoroso controle de torque, podendo facilmente atuar sobre este torque de forma a aumentar ou diminuí-lo sem prejudicar o servomotor [15]. A ausência de gaiola no rotor possibilita uma baixa inércia do mesmo, auxiliando em uma resposta dinâmica mais rápida para um dado torque e uma maior eficiência devido à ausência de perdas por efeito Joule.

O funcionamento do servomotor é semelhante ao dos motores de corrente contínua. Duas grandes diferenças são o mecanismo de comutação e o mecanismo

de controle. Nos servomotores o mecanismo de comutação não é mecânico, é feito eletronicamente por meio de semicondutores, o que resulta na diminuição da manutenção e do momento de inércia. Já o mecanismo de controle possui um tempo de resposta muito pequeno, de modo que ele possa efetuar o controle da corrente da armadura. Para efetuar este controle um dispositivo que realimenta o sistema com a informação da posição do rotor se faz necessário. Este dispositivo pode ser um encoder ou resolver. A partir da informação deste dispositivo é possível impor as correntes de armadura necessárias para o controle do torque do motor bem como as demais grandezas.

Podem-se levantar diversas vantagens dos servomotores em relação aos demais tipos de acionamentos, entre elas:

- Melhor relação potência/volume.
- Ampla faixa de rotação com torque constante.
- Baixa manutenção devido à ausência de escovas.
- Baixa inércia.
- Resposta dinâmica alta

Como desvantagens do uso de servomotores pode-se citar o preço mais elevado desse tipo de acionamento e a dificuldade associada ao controle do mesmo.

3.4. Teste sem Carga

A primeira etapa para análise da performance dos motores em condições próximas daquelas encontradas no processo em questão foi o teste sem carga, isto é, o motor livre para rotacionar seu eixo sem nenhum tipo de acoplamento. Nestas condições os motores não deveriam apresentar limitações para operação fora as próprias limitações construtivas.

O objetivo deste teste é verificar qual o máximo deslocamento angular que cada tecnologia de acionamento testada é capaz de oferecer em diferentes condições de frequência de inversão comandadas. Para o ensaio, as frequências

testadas foram de 40 até 60 Hz, uma vez que essa é a faixa de frequência em que o CMT trabalha.

Os equipamentos necessários para execução deste teste foram:

- **Fonte de tensão:** utilizada na alimentação dos *drivers* dos motores.
- **Gerador de sinais:** utilizado para envio dos sinais de comando do motor, tais como velocidade de rotação e direção.
- **Câmera de alta velocidade:** utilizada na aquisição de imagens para posterior análise do deslocamento angular de cada motor nas situações estudadas. Mais detalhes deste equipamento serão abordados no Capítulo 4.
- **Computador:** utilizado para salvamento dos dados da aquisição realizada pela câmera.

A montagem do equipamento durante um dos testes realizados para o servomotor pode ser observada na Figura 16.



Figura 16 - Equipamentos para realização de testes sem carga.

Os ensaios foram realizados da seguinte maneira para cada motor:

1. Inicialmente foi ajustado o máximo valor de amplitude que o motor seria capaz de percorrer antes de mudar seu sentido de rotação. Este ajuste foi realizado empiricamente de tal forma que o motor não apresentava falhas durante funcionamento.
2. Cada motor foi acionado em 3 diferentes frequências de inversão de movimento: 40 Hz, 50Hz e 60 Hz. Em cada situação utilizou-se a câmera de alta velocidade, com taxa de aquisição de 4000 *frames* por segundo (4000 fps), para gravação das imagens.
3. De posse das imagens obtidas, utilizou-se um software para tratamento das imagens e medição da variação angular em cada situação. Para cada uma dessas medições foi utilizado um conjunto com três amostras de variações angulares e calculou-se a média e o desvio padrão desses valores a fim de uma medição mais próxima da realidade. Esta etapa está exemplificada na Figura 17.

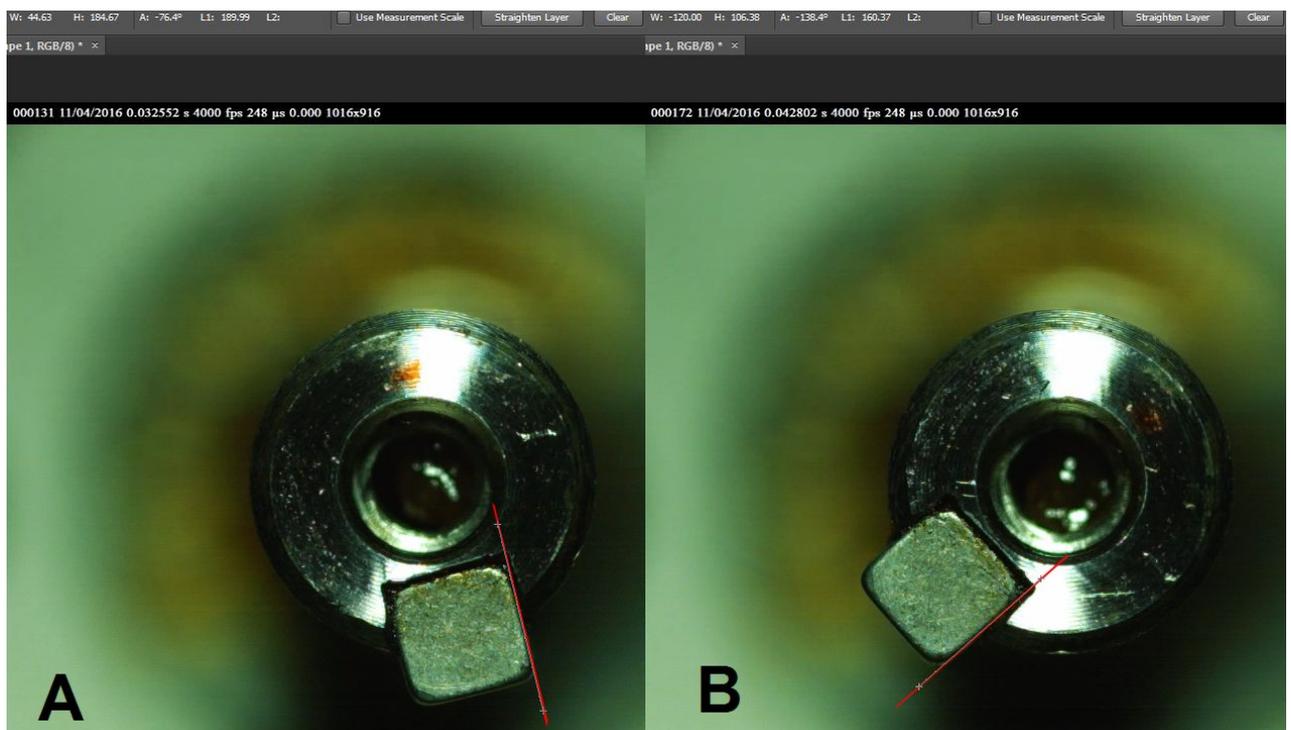


Figura 17 - Exemplo da medição da variação angular de um servomotor com frequência de inversão de sentido de 50 Hz. A - Posição inicial; B - Posição final.

No caso da Figura 17, o motor submetido ao teste era o servomotor de 100 W com uma frequência de inversão de sentido de 50 Hz. Para a medição da figura, o motor estava se deslocando no sentido horário, sendo a imagem "A" seu ponto inicial e a imagem da direita "B" seu ponto final. Na parte superior das imagens é possível ler o ângulo demarcado por uma reta paralela à chaveta do eixo do motor. Na primeira imagem lê-se A : -76.4° e na segunda, A: -138.4° , logo calculando o deslocamento angular, sendo $\Delta\alpha$ o deslocamento angular e α_i e α_f os ângulos iniciais e finais, temos:

$$\Delta\alpha = \alpha_f - \alpha_i$$

$$\Delta\alpha = -76,4 - (-138,4)$$

$$\Delta\alpha = 62^\circ$$

Para estimar quanto de movimentação de arame corresponderia a essa variação angular, um segundo cálculo necessário. Para isso mediu-se o diâmetro de um rolete do cabeçote alimentador de arame da empresa IMC utilizado para movimentação de arames de 1,0 mm de diâmetro (Figura 18) e fez-se uma relação de proporção direta entre deslocamento angular e linear do tipo, sendo R o raio do rolete, e d o deslocamento linear:

$$\pi \cdot R \rightarrow 180^\circ$$

$$d \rightarrow \Delta\alpha$$

$$\therefore d = \frac{\Delta\alpha \cdot \pi R}{180}$$

Como mencionado anteriormente, essa metodologia foi aplicada para três amostras de imagens, com o sucessivo cálculo da média e do desvio padrão para cada conjunto de amostra. Isso se repetiu para todas frequências e motores utilizados e o resultado final pode ser visto na Tabela 1. Vale ressaltar que os valores negativos na tabela são consequência do conjunto de imagens analisadas, representando somente a direção de deslocamento oposta em relação àquelas de valores positivos, não tendo qualquer impacto no resultado final da medição.

Tabela 1 - Resultados do teste sem carga dos motores

Motor	Frequência oscilação (Hz)	Variação angular (°)		Deslocamento linear(mm)
		Valor médio	Desv. padrão	Roleta LABSOLDA 1.0
CA 100W	40	-83.250	0.071	-21.64
	50	-60.833	2.196	-15.81
	60	-46.00	2.722	-11.96
CA 200W	40	84.97	2.663	22.09
	50	59.13	0.551	15.37
	60	46.70	0.173	12.14
DC	40	55.550	1.202	14.44
	50	-28.933	5.468	-7.52
	60	20.60	1.345	5.36
STEP	40	23.15	0.451	6.02
	50	15.37	0.451	3.99
	60	-8.73	0.569	-2.27

Por meio de estudos anteriores realizados pela equipe do LABSOLDA e analisando a versão CMT que está sendo base de estudo, concluiu-se que o valor mínimo de deslocamento linear de arame é de 5 mm por período, tanto para avanço quanto para recuo.

Analisando a Tabela 1 podemos observar o desempenho superior dos servomotores CA em relação aos outros motores testados, especialmente em frequências maiores de inversão, nas quais atingem deslocamentos superiores ao dobro do deslocamento mínimo estabelecido. O motor de passo (STEP na Tabela 1) consegue atingir o deslocamento mínimo desejado somente em baixas frequências, o que torna seu uso inviável para a construção do protótipo. Já o motor DC, apesar de a média dos deslocamentos cumprir o mínimo estabelecido, não foi levado em consideração para a etapa de testes com carga. Isso se deve pelo fato de que os desvios padrões em altas frequências são grandes o suficiente para afastar o valor da média de deslocamento para fora dos padrões estabelecidos. O que também torna seu uso inviável, tendo em vista que busca-se um acionamento confiável.

Concluiu-se então que o mais indicado para uso no protótipo seria um servomotor AC, de potência a ser definida na próxima etapa do trabalho.

3.5. Teste com Carga

Dando continuidade à análise de desempenho dos motores para escolha do mais indicado foi realizado um teste dos mesmos submetidos à carga, no caso, o arame sendo deslocado. O primeiro passo, então, foi encontrar uma estrutura em que os motores pudessem ser fixados e um rolete para deslocamento de arame pudesse ser encaixado no eixo do motor sujeito ao teste.



Figura 18 - Rolete utilizado para deslocamento de arame.

Como estrutura para fixação dos motores foi utilizado um cabeçote alimentador de arame, semelhante ao ilustrado na Figura 19, originalmente criado para soldagens MIG convencional. Este equipamento estava sendo usado ocasionalmente no LABSOLDA para calibração de dispositivos.



Figura 19 - Imagem ilustrativa de cabeçote alimentador de arame utilizado para os ensaios com carga [21].

Por se tratar de um equipamento que já possui um sistema tracionador de arame, o trabalho de acoplamento do conjunto motor e rolete foi facilitado. Este sistema de tracionamento de arame pode ser observado na Figura 20. O resultado final da montagem para este teste pode ser visto na Figura 21.

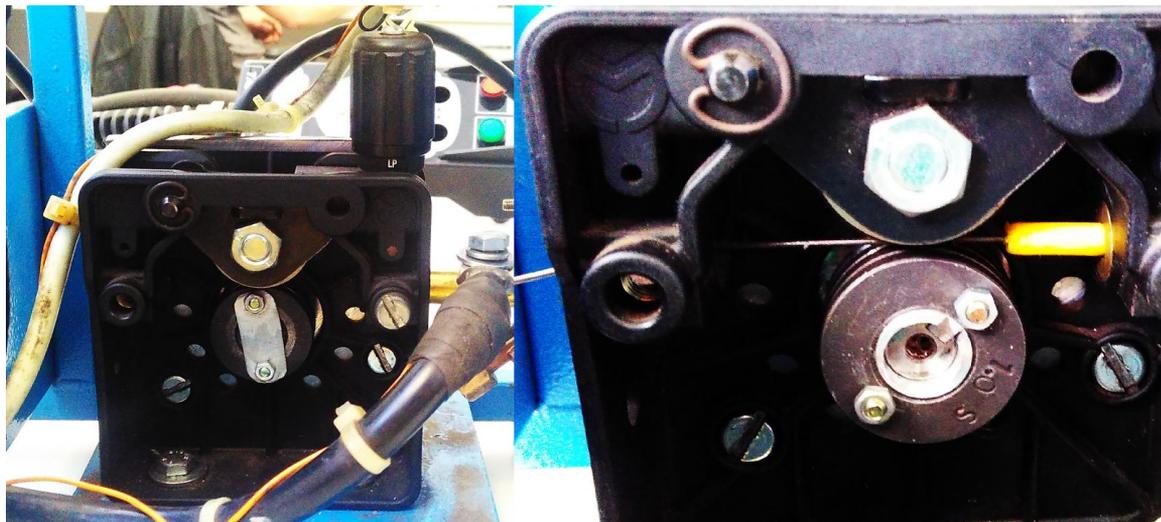


Figura 20 - Sistema tracionador de arame (esq.); Detalhe do arame passando pelo sistema (dir.).

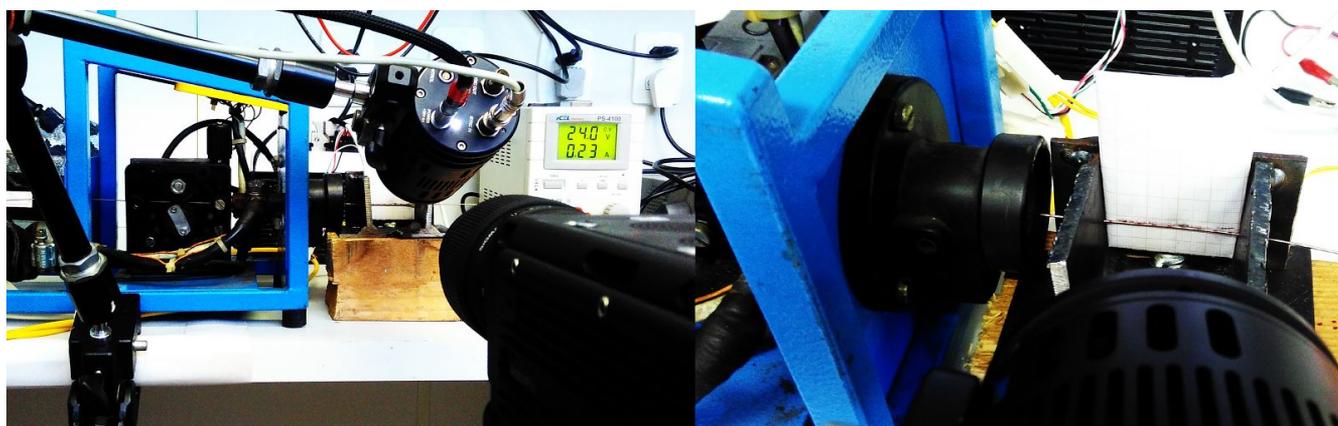


Figura 21 - À esquerda vê-se o posicionamento da câmera e estrutura para testes com carga e à direita, detalhe do arame na região de captura de imagens

Para que o deslocamento efetivo de arame pudesse ser medido foi necessário estabelecer uma referência de distância junto com a captura das imagens. Nos testes realizados essa referência foi estabelecida pelo uso de papel milimetrado como fundo na estrutura em que se apoiou o arame para o deslocamento. Dessa forma, o papel milimetrado saiu como segundo plano nas imagens obtidas nos ensaios, conforme podemos observar na Figura 22. Além da referência de distância foi necessário fazer marcas no arame de modo que os pontos inicial e final de deslocamento pudessem ser facilmente apontados. Estas marcas também podem ser observadas na Figura 22.

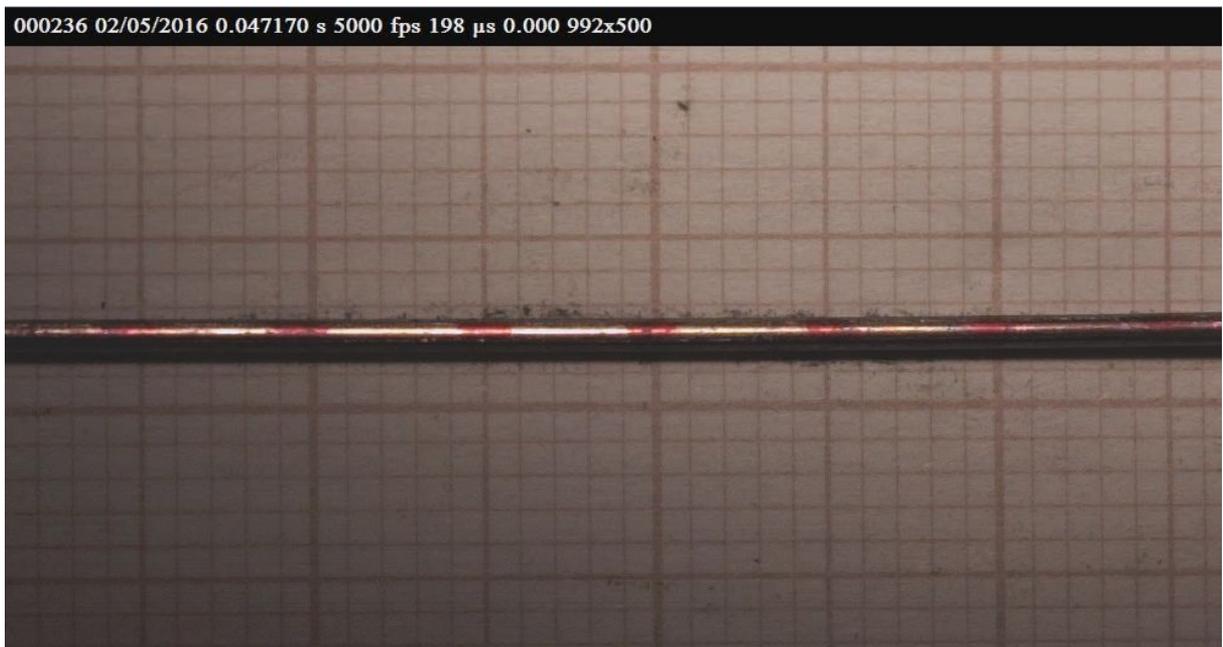


Figura 22 - Detalhe da referência de posicionamento utilizada nos ensaios com carga.

O levantamento de dados para o teste com carga foi feito de forma similar ao teste anterior, com a diferença que agora mediu-se o deslocamento linear de arame e nenhum cálculo adicional foi necessário. Adicionou-se também o teste para a frequência de 30 Hz a título de comparação. O mesmo software foi utilizado neste segundo conjunto de medições e o resultado final obtido pode ser analisado na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados do teste com carga dos motores

Motor	Frequência oscilação (Hz)	Velocidade linear (m/min)	Deslocamento (mm)	
			LABSOLDA 1.0	
			Valor médio	Desv. padrão
CA 100W	30	77.003	21.13	0.33
	40	64.540	13.54	0.39
	50	-60.836	-10.27	0.11
	60	51.48	6.86	0.14
CA 200W	30	87.59	24.23	0.53
	40	-71.39	-14.67	0.13
	50	-60.48	-10.22	2.11
	60	38.93	5.28	0.03

A tabela revela que o comportamento de ambos servomotores foi bastante similar e ambos obedeceram ao limite mínimo de deslocamento de arame previamente estabelecido. Assim optou-se por utilizar o servomotor de 100 W de potência por dois motivos principais. O primeiro deles foi devido ao seu tamanho reduzido, o que reflete no peso do equipamento e no espaço por ele ocupado. O segundo motivo se dá em relação ao momento de inércia do rotor também menor, que representa aproximadamente um terço do valor do servomotor de 200 W, o que afeta diretamente o esforço que o motor deve realizar em cada inversão de sentido. Quanto menor o momento de inércia maior a facilidade e velocidade de inversão o que traz consequências positivas para a aplicação almejada neste trabalho.

3.6. Detalhamento do acionamento escolhido

Após a escolha do servomotor AC necessitou-se estudar mais a fundo suas características construtivas e de controle. As principais características desse acionamento podem ser lidas em seu *datasheet* [16].

O *driver* utilizado para o controle do servomotor é recomendado pelo fabricante, no caso do servomotor de 100 W foi utilizado o modelo MADDT1205 [17]. Este *driver* pode ser visualizado na Figura 23.



Figura 23 - *Driver* para controle do servomotor AC Panasonic.

O *driver* permite o uso de diferentes formas de sinal de comando. O formato de pulsos de comando escolhido para utilização neste trabalho foi o denominado “*Pulse train + Sign*” pelo fabricante, também chamado “STEP + DIR” (passo e direção) por outros. São dois sinais que interpretados pelo *driver* são utilizados como referência para velocidade, posição e direção. O primeiro sinal, STEP, é um trem de pulsos com frequência definida pelo controle. Em cada borda de subida do sinal o *driver* compreende como um “passo” a ser dado, semelhante ao funcionamento dos motores de passo. Assim, quanto maior a frequência deste pulso, mais passos o motor realizará e, por consequência, maior será sua velocidade. Já o segundo sinal, chamado de DIR, é a referência de direção de rotação. É um sinal binário no qual o estado alto representa o sentido horário e o estado baixo, o sentido anti-horário. Estes sinais estão ilustrados na Figura 24.

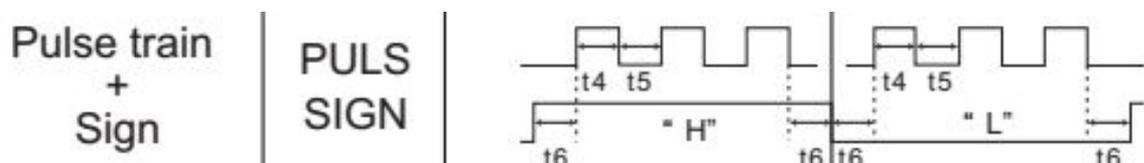


Figura 24 - Sinais de STEP (*Pulse train*) e DIR (*Sign*) [17].

3.7. Resumo do Capítulo

Neste capítulo foram estudados os diferentes tipos de sistema de acionamentos disponíveis no LABSOLDA. No primeiro momento foram levantadas as características básicas de construção e funcionamento dos seguintes tipos de motores: motor DC, motor de passo e servomotor AC. Em um segundo momento explicou-se como o teste sem carga foi realizado e os resultados que levaram ao descarte do uso dos motores de passo e motor DC. Em seguida, explicou-se como foi realizado o teste com os motores submetidos à carga e os resultados deste teste foram expostos. Concluiu-se então que o acionamento mais adequado para utilização neste trabalho seria um servomotor AC de 100 W de potência e comentou-se brevemente sobre o *driver* utilizado para controle desse dispositivo, bem como sobre os sinais de controle que o mesmo utiliza.

Capítulo 4: Montagem do Protótipo, Equipamentos e Periféricos de Soldagem

Com o objetivo de realizar os ensaios de soldagem e validar as estratégias de controle desenvolvidas montou-se um protótipo para alimentação dinâmica de arame. Neste capítulo será exposto o processo de criação do protótipo e serão apresentados os equipamentos e periféricos de soldagem utilizados na execução deste trabalho.

4.1. Montagem do Protótipo

O protótipo criado evoluiu a partir da estrutura montada para a realização dos ensaios de carga dos servomotores. A estrutura já estava com o motor posicionado e seu eixo acoplado ao dispositivo de tracionamento de arame, faltando apenas a tocha para alimentação gasosa e de corrente elétrica para se tornar utilizável em ensaios de soldagem.

Para fins de otimizar o aproveitamento do movimento do arame, foi instalado um pescoço de tocha diretamente na saída de arame dos roletes tracionadores. Algumas partes do cabeçote puderam ser aproveitadas para a fixação da tocha, necessitando somente de pequenas adaptações. O resultado do trabalho pode ser visto nas Figura 25 e Figura 26. Ainda na Figura 26 pode-se observar a entrada para a mangueira de gás que alimenta a tocha, indicada pela seta e o cabo de corrente proveniente da fonte de soldagem e sua conexão com a tocha.

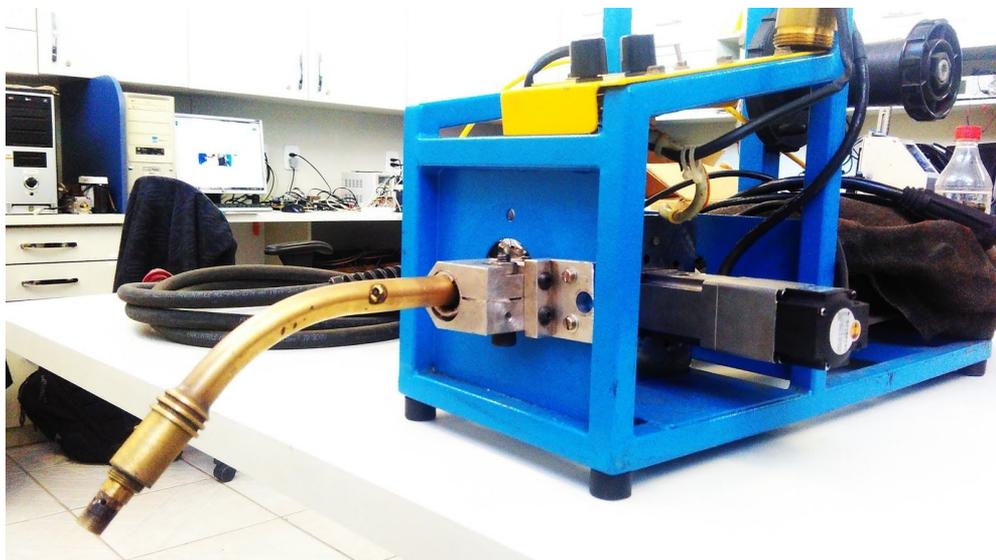


Figura 25 - Exterior do cabeçote de alimentação com a tocha fixada.

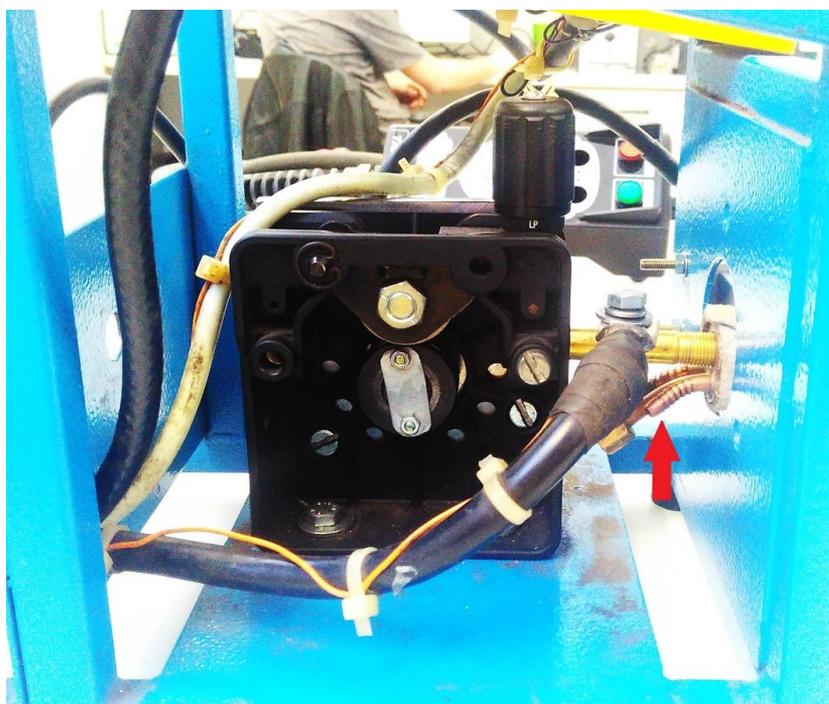


Figura 26 - Parte interna do cabeçote de alimentação com destaque para a entrada da mangueira de gás.

4.2. Equipamentos e Periféricos de Soldagem

Em conjunto com o dispositivo de alimentação dinâmica e tocha foram usados uma série de equipamentos que permitiram a execução e monitoração dos ensaios. A seguir serão apresentados esses equipamentos juntamente com uma breve descrição e seu papel dentro do contexto do trabalho.

- **Fonte de soldagem IMC DIGIplus 600A:** As fontes de Soldagem da linha DIGIPlus possuem um avançado processador ARM de 32 bits, o que permite operar com diversas modalidades de soldagem com elevado desempenho no controle do arco e da transferência metálica [18]. A fonte conta com uma interface para interação com o usuário onde se colocam os parâmetros de entrada necessários para o processo. Essa fonte foi utilizada com duas diferentes configurações de controle de corrente: PWM e controle baseado em valores extremos. O primeiro modo utiliza um sinal PWM que comanda a passagem da corrente proporcionalmente a largura do pulso. O segundo modo faz uso de um controle *on-off*, no qual o valor da corrente varia dentro de um intervalo, entre os chamados “valores extremos”, e a fonte chaveia em uma frequência de 30 kHz a saída de corrente de modo que o valor de referência seja a média dos valores dentro do intervalo. O modelo da fonte pode ser visualizado na Figura 27.



Figura 27 - Fonte de soldagem IMC DIGIplus [18].

- **Cabeçote alimentador de arame:** A principal função do cabeçote de alimentação é armazenar e fornecer arame para todo o sistema. É o sistema de alimentação secundário. O sinal de controle do motor desse equipamento é enviado pela fonte de soldagem. Pode-se visualizar este equipamento na Figura 28.



Figura 28 - Cabeçote alimentador de arame [18].

- **Tartílope V2:** O Tartílope V2 é um sistema de movimentação automática em dois eixos para aplicação em processos de soldagem e corte de chapas metálicas. O sistema é composto basicamente de três partes: teclado, módulo eletrônico e dispositivo mecânico. O teclado possui a função de interface com o usuário. O módulo eletrônico processa e controla os movimentos, possui drivers que geram os sinais de forma de onda de tensão e corrente para os motores de passo do sistema. O dispositivo mecânico é composto de um dispositivo móvel (que contém dois motores de passo) o qual corre por sobre um trilho com 1,18m de comprimento [19]. Como o protótipo construído é bastante volumoso, optou-se por realizar a movimentação da peça submetida à soldagem, então o Tartílope V2 foi utilizado com esta finalidade. Pode-se visualizar esse sistema na Figura 29.



Figura 29 - Tartilope V2 [19].

- **Câmera de alta velocidade IDT Y4-S2:** A câmera de alta velocidade foi utilizada para a gravação de imagens da dinâmica do arco, bem como dos motores. O modelo possui capacidade para a gravação de até 5100 *frames* por segundo com a resolução de 1024 x 1024 px. Pode-se visualizar este equipamento na Figura 30.



Figura 30 - Câmera de alta velocidade [22].

- **Sistema de Aquisição Portátil - SAP:** O Sistema portátil de monitoração de processos de soldagem é uma ferramenta para análise do processo de soldagem. Com ele é possível fazer a leitura instantânea das grandezas corrente, tensão, velocidade de arame e vazão de gás para até duas estações de soldagem, com tempo configurável de até 600 segundos, com taxa de amostragem de 50000

pontos por segundo para cada variável [20]. Pode-se visualizar o SAP na Figura 31.



Figura 31 - Sistema de Aquisição Portátil - SAP [20].

Os equipamentos necessários para realização de ensaios de soldagem foram reunidos e sua disposição geral pode ser visualizada na Figura 32.



Figura 32 - Disposição geral dos equipamentos: 1 - Fonte de soldagem; 2 - Cabeçote de alimentação de arame; 3 - Tartilope V2; 4 - Protótipo de alimentação dinâmica de arame.

4.3. Resumo do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados e descritos os equipamentos que foram necessários para a execução deste trabalho. Iniciou-se comentando sobre a montagem do protótipo com a inclusão da tocha de soldagem. Em seguida foram descritos os equipamentos e sua função dentro do projeto, foram eles: fonte de soldagem, cabeçote de alimentação de arame, sistema de movimentação Tartilope V2, câmera de alta velocidade e o sistema de aquisição SAP.

Capítulo 5: Controle do Processo

O assunto a ser abordado neste capítulo é o controle do processo em geral. Serão mostradas as diferentes etapas do processo de soldagem e qual estratégia utilizada para o controle de cada uma delas. Será discutido também o tópico sobre a sincronia da alimentação secundária, de modo que não falte e não sobre arame para o acionamento localizado na tocha.

5.1. Controle das Etapas de Soldagem

A divisão do processo em etapas facilita a compreensão e o controle do mesmo. A primeira divisão buscou distinguir as etapas de abertura, soldagem e de finalização do processo. A etapa de abertura se faz necessária para levar o processo do estado inicial às condições necessárias para a realização da soldagem propriamente dita, que constitui a segunda etapa do processo. Por fim, a etapa de finalização permite que o término do processo se dê de forma controlada, lógica e que possibilite o reinício do ciclo. Essa divisão está ilustrada na Figura 33.

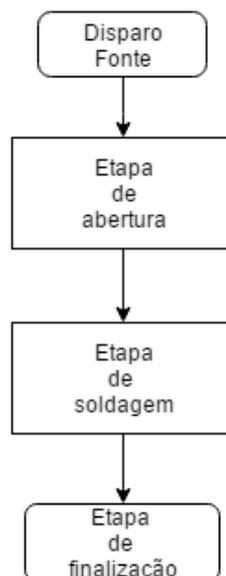


Figura 33 - Primeira divisão das etapas do processo.

Cada etapa possui suas particularidades que serão explicadas na sequência. Na Figura 34 pode-se analisar o fluxograma onde está apresentado o detalhamento da etapa de abertura.

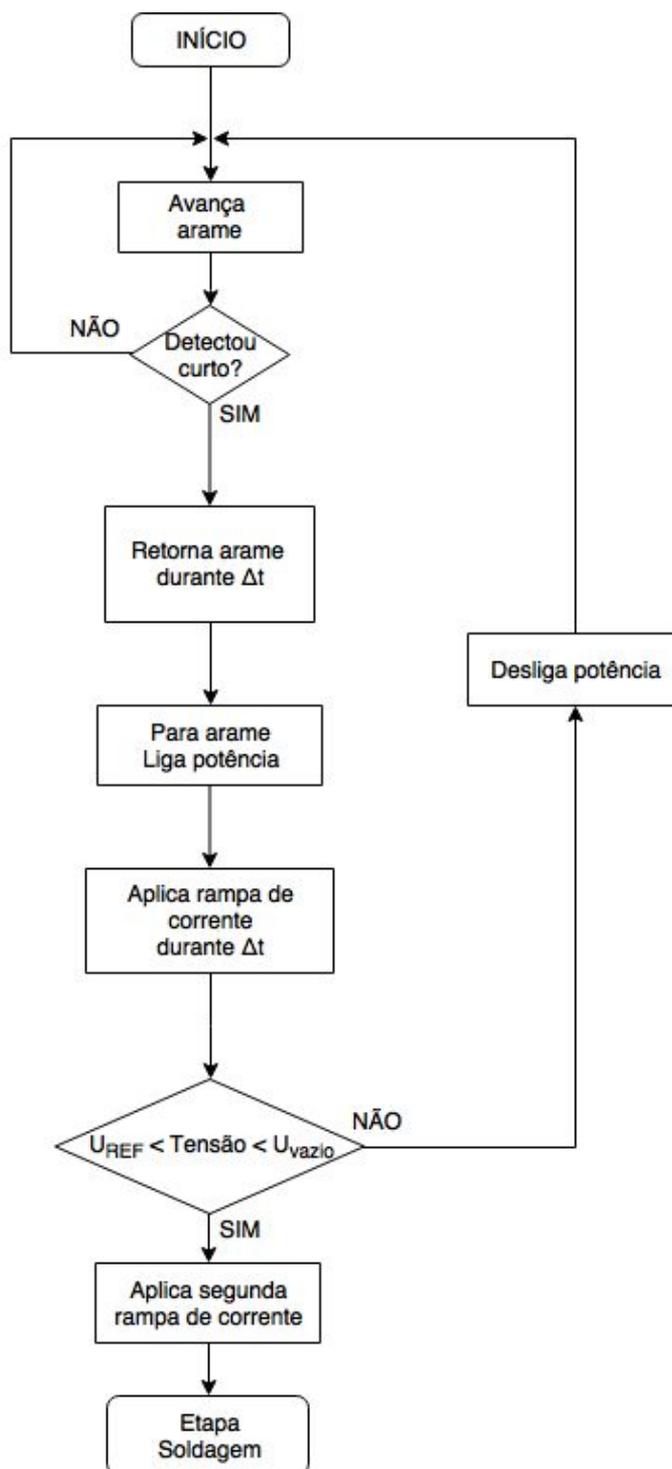


Figura 34 - Fluxograma da etapa de abertura.

O primeiro passo nesta etapa consiste no avanço do arame-eletrodo até que o mesmo entre em contato com a peça a ser soldada. A partir do momento em que o curto-circuito é detectado o sistema retorna o arame por um tempo predeterminado e então habilita a potência da fonte para que ela possa fornecer a corrente para o processo. A fonte impõe uma curva de corrente crescente, também por um tempo predeterminado, na tentativa de ionizar o gás e permitir a criação do arco elétrico. Após esse tempo realiza-se uma leitura de tensão entre os terminais do processo. Caso a tensão lida seja maior que a tensão de referência para o arco e menor que a tensão em vazio¹, indica que o arco elétrico foi estabelecido com sucesso. Em caso negativo o sistema volta ao início e realiza uma nova tentativa. Após o sucesso da abertura do arco aplica-se uma nova curva crescente de corrente para aumentar os níveis de energia e garantir a estabilidade do arco. Seguindo a fase de abertura, o processo vai para a etapa de soldagem.

A etapa de soldagem é a de regime contínuo do processo. Para controle desta etapa utilizou-se o gráfico da Figura 35 como referência. Neste gráfico é possível observar três níveis diferentes de corrente (gráfico superior) e como essa corrente sincroniza com os comandos de direção do motor (gráfico inferior). O nível mais alto de corrente corresponde à chamada etapa de pulso, o nível intermediário, etapa de base e o nível mais baixo de corrente corresponde à etapa de curto.

¹ Tensão entre os terminais da fonte quando a potência está habilitada e não está submetida a nenhuma carga.

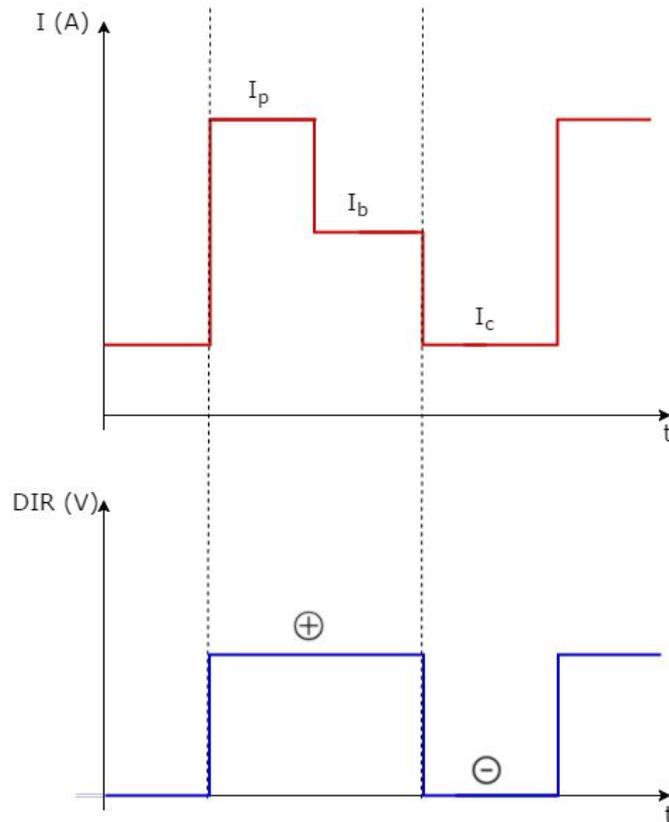


Figura 35 - Gráficos teóricos de corrente e direção de avanço de arame.

De posse desses perfis de corrente e direção de arame pode-se compreender o algoritmo de controle das etapas de soldagem representado pelo fluxograma da Figura 36.

A etapa de soldagem se inicia após a etapa de abertura. O primeiro estágio do processo é a etapa de base e a primeira ação nessa fase é o avanço de arame até a detecção do curto-circuito. Caso a detecção do curto-circuito não ocorra dentro de um limite de tempo preestabelecido o sistema interpreta como um erro e desliga a potência da fonte bem como o motor de acionamento da tocha. Essa proteção no controle é necessária pelo fato de que algum acontecimento ou falha mecânica pode acontecer na alimentação de arame e, neste caso, o acionamento da tocha continuaria acionado no sentido de alimentar o arame o que pode agravar ainda mais a situação.

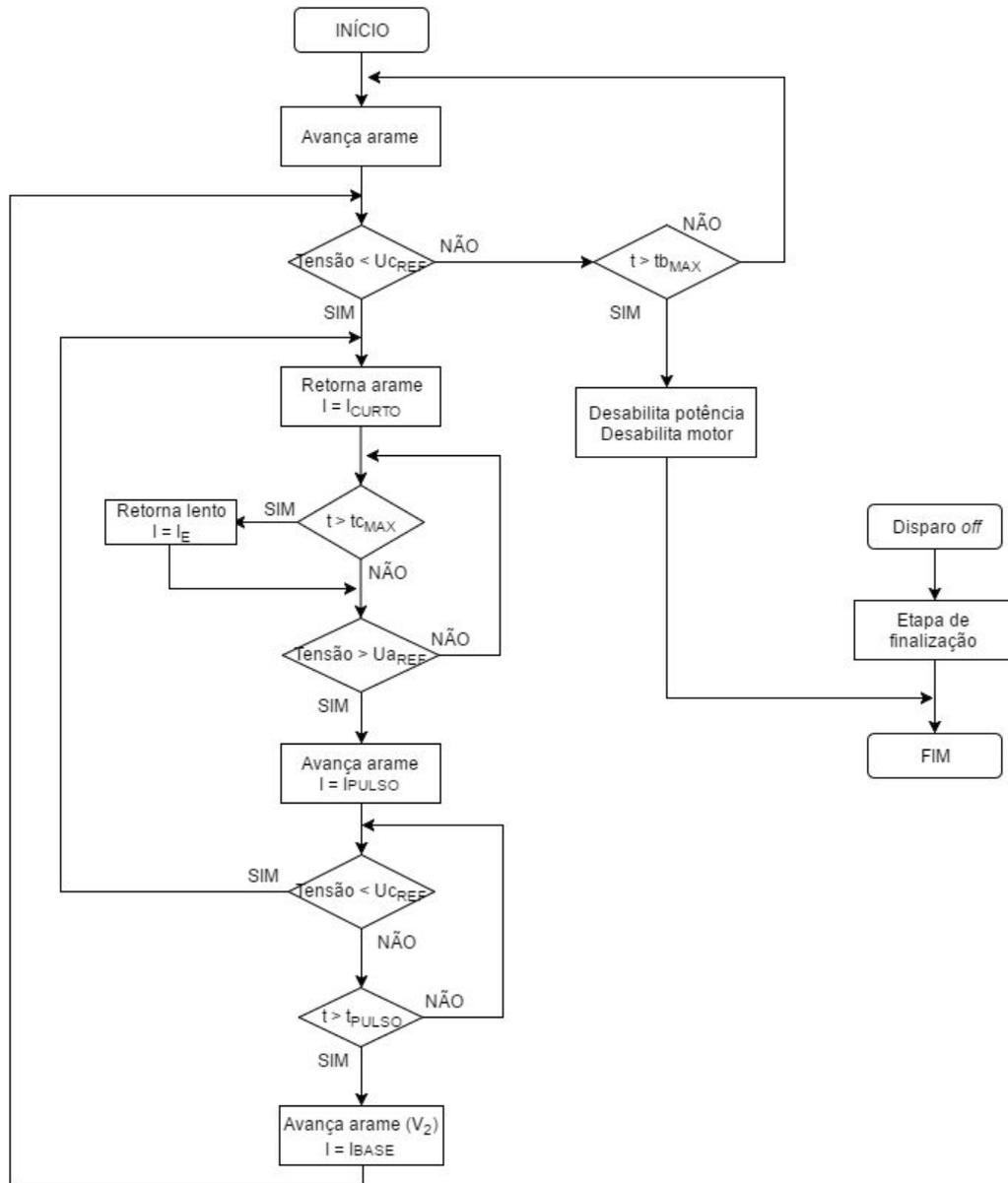


Figura 36 - Fluxograma do funcionamento da etapa de soldagem.

Dando continuidade à situação normal de operação, após a leitura do curto-circuito, a fonte impõe o valor configurado para a corrente de curto-circuito e inicia o processo de recuo de arame. Da mesma forma que na etapa anterior, existe uma proteção de limite temporal máximo para o processo permanecer neste estágio. Essa proteção existe para evitar que o arame se solidifique e se una com a peça de forma que seu recuo seja impossibilitado. Caso o período de curto-circuito ultrapasse o limite máximo, o sistema de controle aciona a fonte para aumentar a corrente e aciona o motor da tocha para retornar o arame de forma mais lenta até que a união entre arame e peça se desfça. A partir desse momento o processo

está em condições de voltar a normalidade. O recuo de arame nesta etapa provoca um aumento de tensão entre os dois pólos do processo. Quando a tensão ultrapassa o valor indicador de arco aberto inicia-se o estágio de pulso.

No estágio de pulso, o controle configura o avanço de arame e comanda um pulso de corrente na fonte. Esse pulso acaba quando o tempo predeterminado se esgota. Nesta etapa existe uma proteção com relação ao curto-circuito. Caso o tempo predeterminado para o pulso seja suficientemente grande para o arame avançar até o contato com a peça o processo interpreta como um curto-circuito regular e pula a etapa de base, retornando para a etapa de curto-circuito.

Após o término do pulso de corrente, o processo recomeça no estágio de base, a corrente passa para o valor determinado para esta etapa, finalizando no evento de detecção de curto-circuito e garantindo a repetitividade do processo.

Durante toda a operação do processo o sistema de controle monitora os sinais do dispositivo utilizado pelo operador, chamado disparo, para iniciar e finalizar o processo de soldagem. Quando o disparo é acionado para finalizar o processo, imediatamente é iniciada a etapa de finalização, cujo funcionamento pode ser analisado com o auxílio do fluxograma da Figura 37.

A principal função da etapa de finalização é garantir que o arame não termine o processo aderido ao cordão de solda, ou seja, que o processo nunca termine em uma fase de curto. A estratégia utilizada é a realização de, pelo menos, uma etapa de base, uma de curto e uma de pulso. Neste caso, a etapa de pulso difere daquela realizada na soldagem pelo fato de também recuar o arame. Após essa etapa é realizada uma leitura de tensão para garantir que não há contato entre arame e peça de trabalho. Caso haja esse contato o processo volta a etapa de curto e realiza um novo ciclo. No caso geral não há o contato e, então, o controle comanda o desligamento da potência da fonte e o motor da tocha.

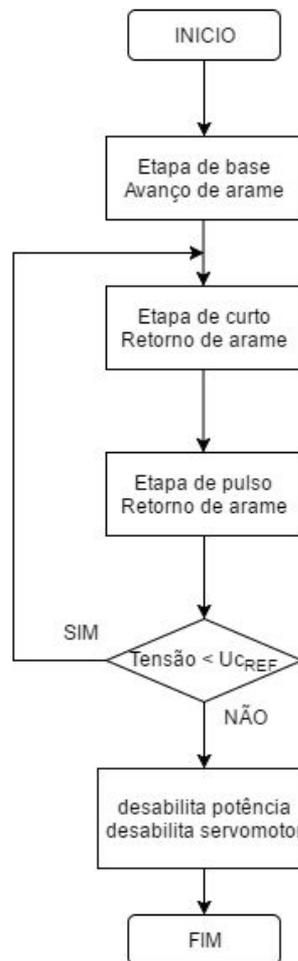


Figura 37 - Fluxograma do do funcionamento da etapa de finalização.

Após a elaboração da estrutura do controle do processo, garantindo a sincronia dos parâmetros elétricos de soldagem e os parâmetros necessários para a correta alimentação de arame na tocha, foi necessário desenvolver uma estratégia adicional para a inclusão do motor secundário na sincronia do processo como um todo.

5.2. Sincronismo entre os Motores da Tocha e do Cabeçote

Para prover o adequado fornecimento de arame ao motor responsável pelo avanço e recuo de arame é necessário que haja algum sincronismo entre os dois motores. O uso da alimentação secundária no protótipo de alimentação dinâmica de arame foi necessário para desafogar o acionamento localizado no corpo da tocha.

Inicialmente esse acionamento também era responsável pela extração de material de adição do rolo de arame. Durante a realização de testes verificou-se que o motor sofria frequentes erros de sobrecarga. Visando solucionar este problema foi utilizado um cabeçote alimentador de arame cuja função é, exclusivamente, fornecer arame conforme o necessário para o motor da tocha.

A estratégia concebida para suprir a quantidade necessária de arame para o acionamento da tocha foi fazer a aquisição da velocidade instantânea do servomotor e, então, realimentar o sistema com esta informação. Para isso, o *driver* do servomotor da tocha fornece um sinal de tensão analógico proporcional a velocidade do mesmo. Para utilização deste sinal foi necessário criar um circuito para reduzir a faixa de leitura de tensão, devido a limitações da placa de controle localizada na fonte de soldagem. Este circuito foi obtido pelo uso de amplificadores operacionais (AmpOp).

A partir do momento em que foi possível fazer a leitura da velocidade instantânea do servomotor, o controle do motor adicional foi simplificado. Durante um período do processo (etapa de pulso, base e curto) realiza-se a média da velocidade e alimenta-se o motor secundário com esse resultado de velocidade.

5.3. Resumo do Capítulo

Este capítulo compreendeu as técnicas de controle utilizadas em todo o processo de forma simplificada. Iniciou-se dividindo o processo geral em etapas (abertura, soldagem e finalização) e descreveu-se o funcionamento de cada uma delas. Conclui-se descrevendo a necessidade e como se deu o controle e sincronia do motor secundário ao processo.

Capítulo 6: Resultados Obtidos

Neste capítulo constam os resultados obtidos com a evolução do protótipo de alimentação dinâmica. Serão discutidos os problemas encontrados e as soluções propostas. Serão apresentados os resultados em forma de oscilogramas e fotografias dos cordões de solda obtidos nos ensaios.

6.1. Modos de Controle

Como mencionado no capítulo anterior, a fonte de soldagem foi testada com dois tipos de estratégia de controle de corrente, PWM e por valores extremos. Nos oscilogramas apresentados na Figura 38 e Figura 39 pode-se observar o controle PWM e por valores extremos, respectivamente. Vale ressaltar que os ensaios foram realizados com os mesmos parâmetros a fim de comparação dos resultados.

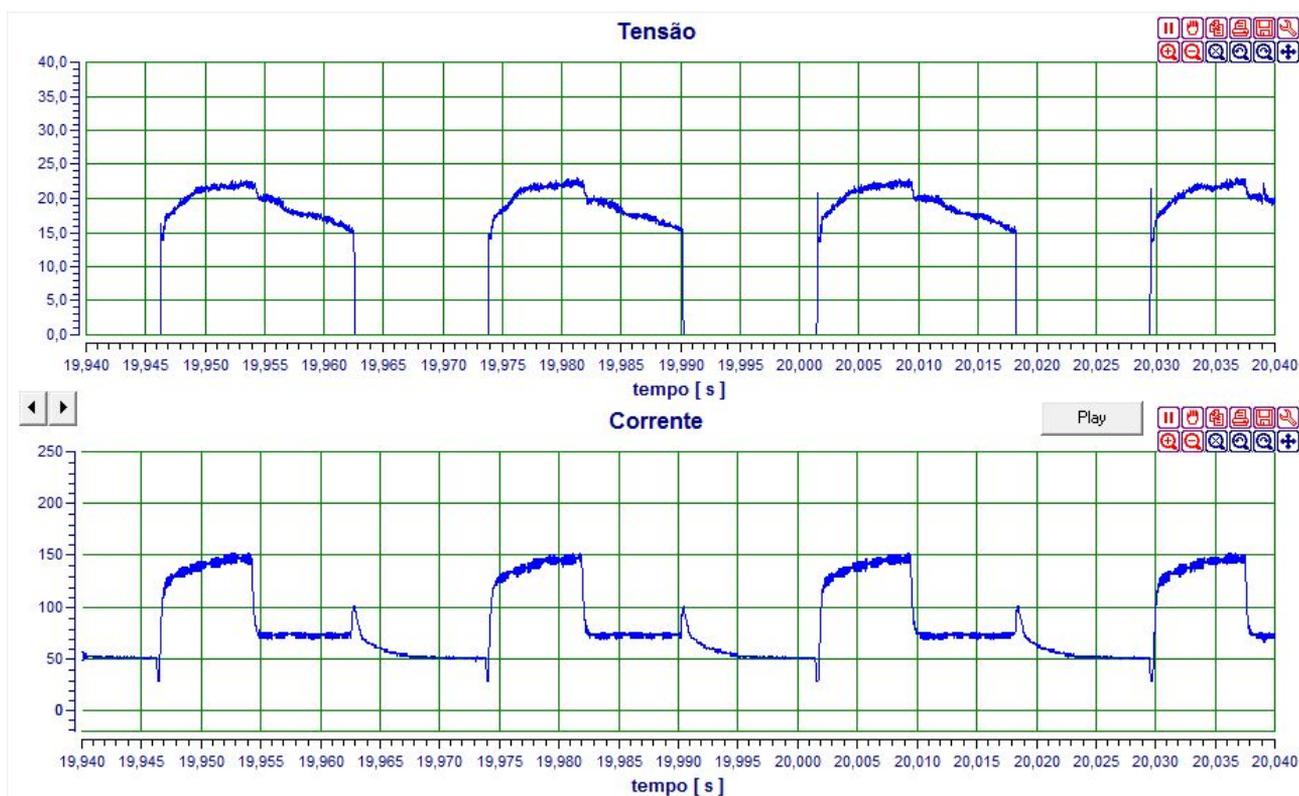


Figura 38 - Resultado dos perfis de corrente no controle da fonte por PWM.

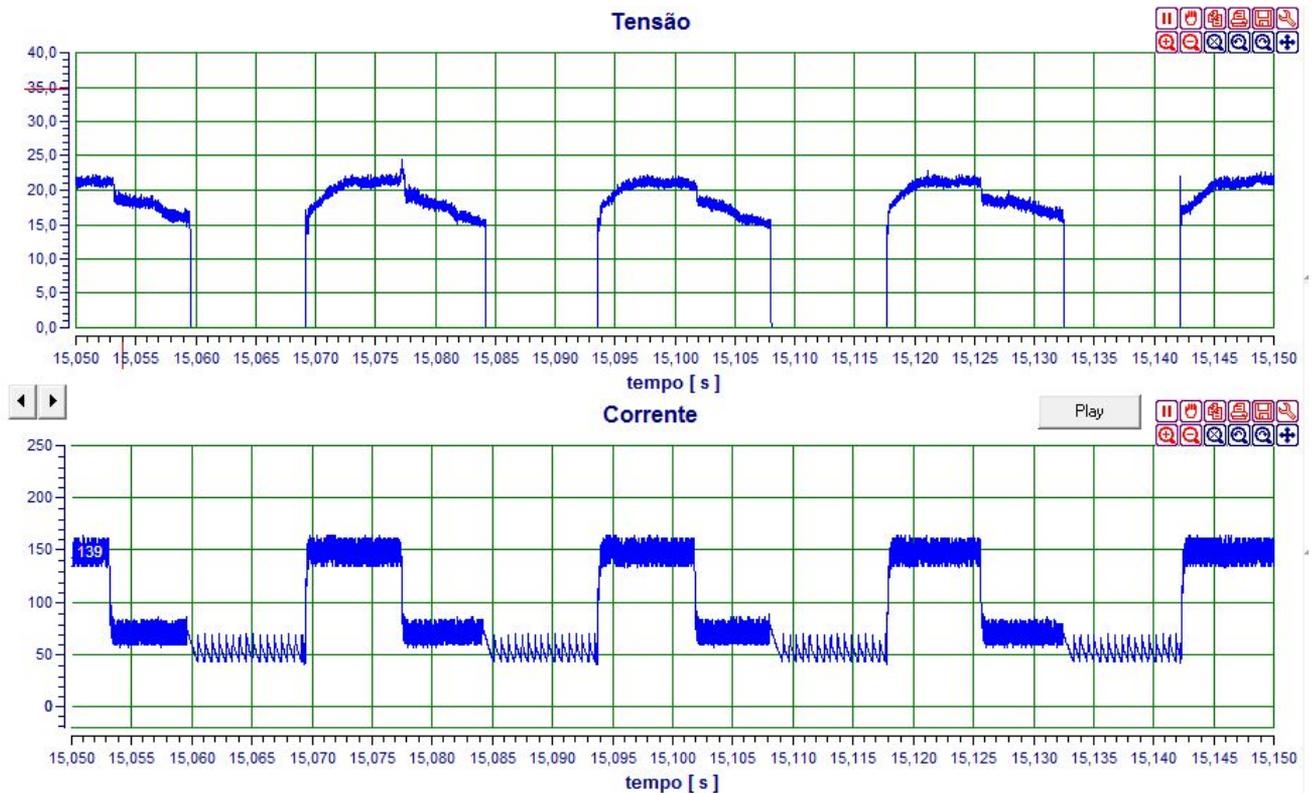


Figura 39 - Resultado dos perfis de corrente no controle da fonte por valores extremos.

Analisando as imagens, pode-se notar as diferenças entre os modos de controle com relação à corrente que circula no sistema. No primeiro oscilograma destaca-se duas características principais. A primeira delas é o tempo de acomodação para o valor de referência de corrente. O sistema não consegue responder com uma boa velocidade para a grande variação de referência na etapa de pulso, somente atinge o valor de referência (150 A) nos instantes finais do pulso. A outra característica que nota-se é o *overshoot* de corrente na ocasião de curto-circuito e abertura de arco. Isso acontece devido à diferença entre a resistência do sistema nas etapas de arco e de curto. Na transição entre a etapa de base e de curto, por exemplo, a fonte está enviando uma quantidade intermediária de corrente, no instante em que a tensão vai a zero essa mesma energia é o suficiente para proporcionar um salto no valor da corrente, uma vez que o sistema se encontra em curto-circuito e os valores de resistência tendem a valores bem reduzidos. Após um certo tempo o controle da fonte já consegue se adequar aos valores determinados.

Já no segundo oscilograma pode-se observar a faixa de variação da corrente no modo de controle por valores extremos. A resposta do controle frente às mudanças de referência é suficientemente rápida para que não haja nenhum *overshoot* além da faixa de variação de corrente. Como o sistema em desenvolvimento beneficia-se pelo uso de menores períodos de pulsos e a flutuação dos valores de corrente não gerou impactos negativos nos resultados, optou-se por continuar o trabalho utilizando o controle do tipo *on-off* exibido na Figura 39.

6.2. Etapas de Soldagem

No capítulo 4 mostrou-se que o sistema foi dividido em etapas visando simplificar a estratégia de controle. O comportamento do sistema em cada etapa é apresentado a seguir.

Na Figura 40 é apresentado um oscilograma com destaque para a etapa de abertura. Nela pode-se observar os dois perfis de corrente antes de iniciar a etapa de pulsos. Observa-se também que o início do crescimento da corrente se dá após a queda de tensão, indicando o acontecimento do curto-circuito.

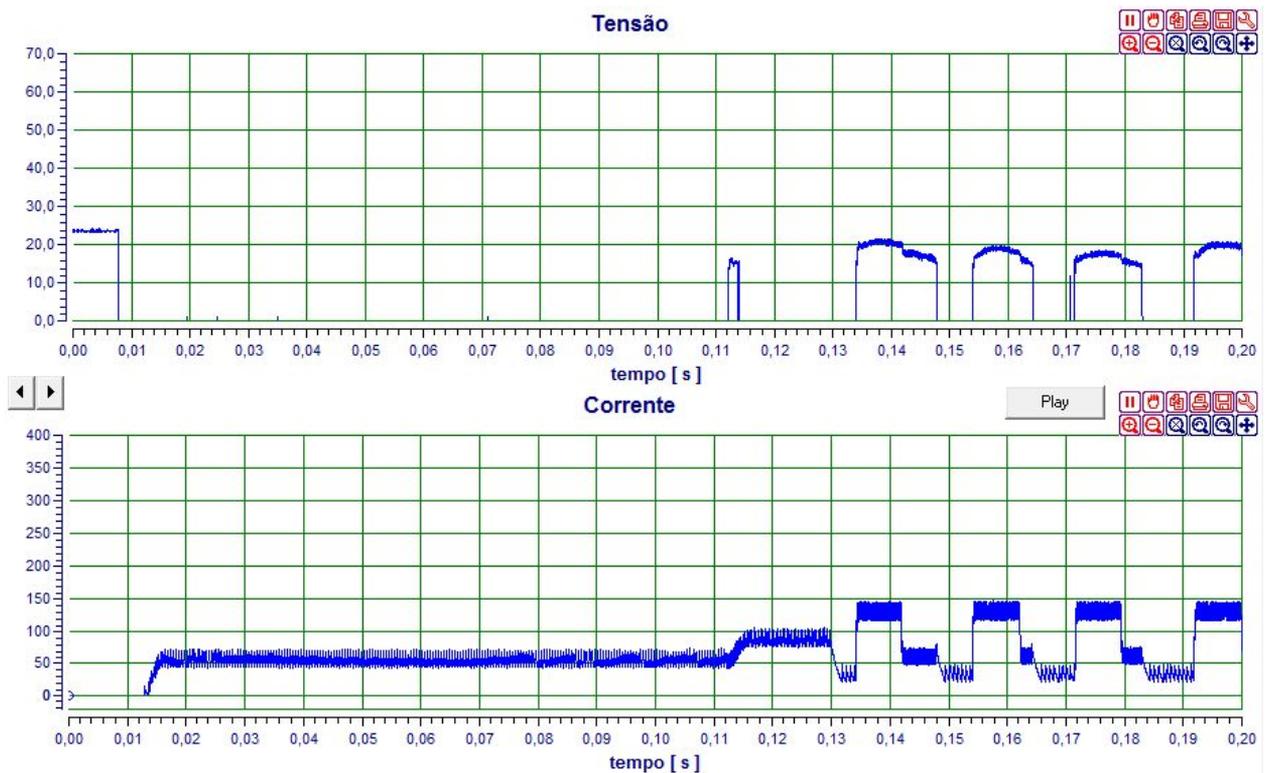


Figura 40 - Oscilograma com destaque para etapa de abertura.

A Figura 41 é o resultado da estratégia de controle na etapa de soldagem. Pode-se observar que existem três níveis de corrente bem definidos, um para cada estágio do processo. Outra característica importante é a repetibilidade dos pulsos, fundamental para resultados uniformes do processo de soldagem e, nesse caso, é totalmente dependente da estabilidade no controle do avanço e recuo do arame.

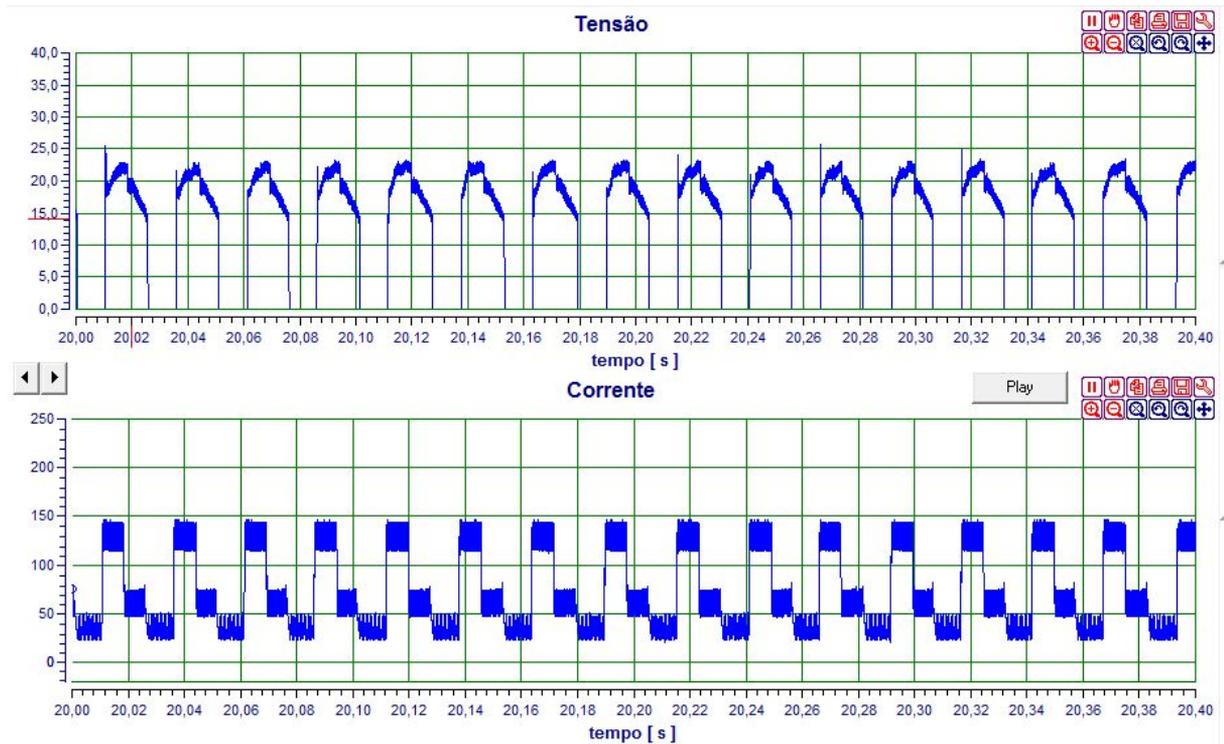


Figura 41 - Oscilograma com destaque para etapa de soldagem.

Na Figura 42 é apresentado um oscilograma com destaque para a etapa de finalização. O resultado que garante o sucesso do controle é o valor de tensão elevado após o pulso final, indicando que o arame não está em contato com a peça.

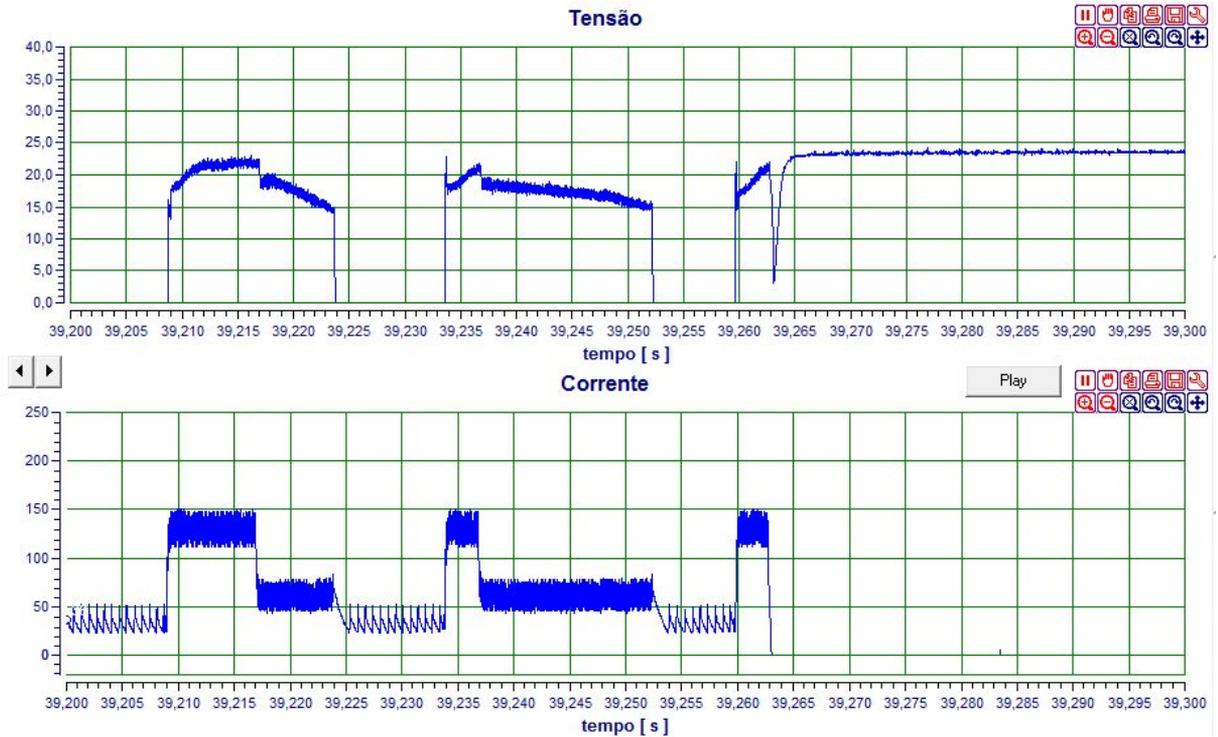


Figura 40 - Oscilograma com destaque para etapa de finalização.

6.3. Proteções do Controle

Em algumas situações pôde-se verificar o resultado das proteções inseridas na estrutura do controle de modo que o sistema seja o mais robusto possível, contornando as falhas mais frequentes e reestabilizando a operação. Os oscilogramas das Figuras 41 e 42 ilustram duas ocasiões que essas proteções foram ativadas.

Na Figura 41, o processo permaneceu em sua etapa de base (apontada pela seta) por um período superior que o limite estabelecido de 50 ms, indicando uma falha na alimentação de arame, por exemplo, o trancamento do arame no bico de contato. Sendo assim o controle do sistema atuou no sentido de interromper o processo, desligando a potência da fonte e o acionamento da alimentação de arame na tocha.

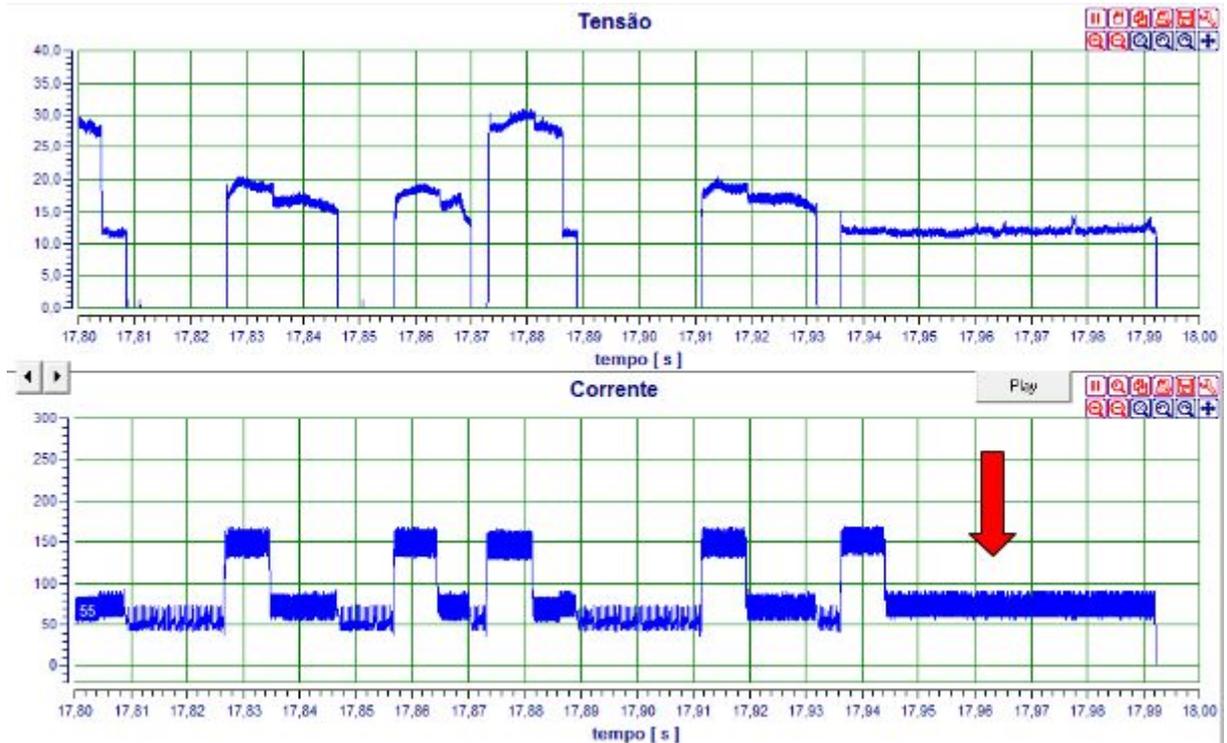


Figura 41 - Proteção no controle para falha na alimentação de arame

Na Figura 42 está ilustrada uma situação em que o arame se solidifica em contato com a peça e fica aderido a ela. Neste caso o controle atua no sentido de descolar o arame, aumentando a corrente e recuando o arame de forma mais lenta. Na Figura 42 nota-se a curva da corrente com valor mais elevado que os demais valores, enquanto que a tensão assume valores próximos de zero, indicando estado de curto-circuito e arame em contato com a peça.

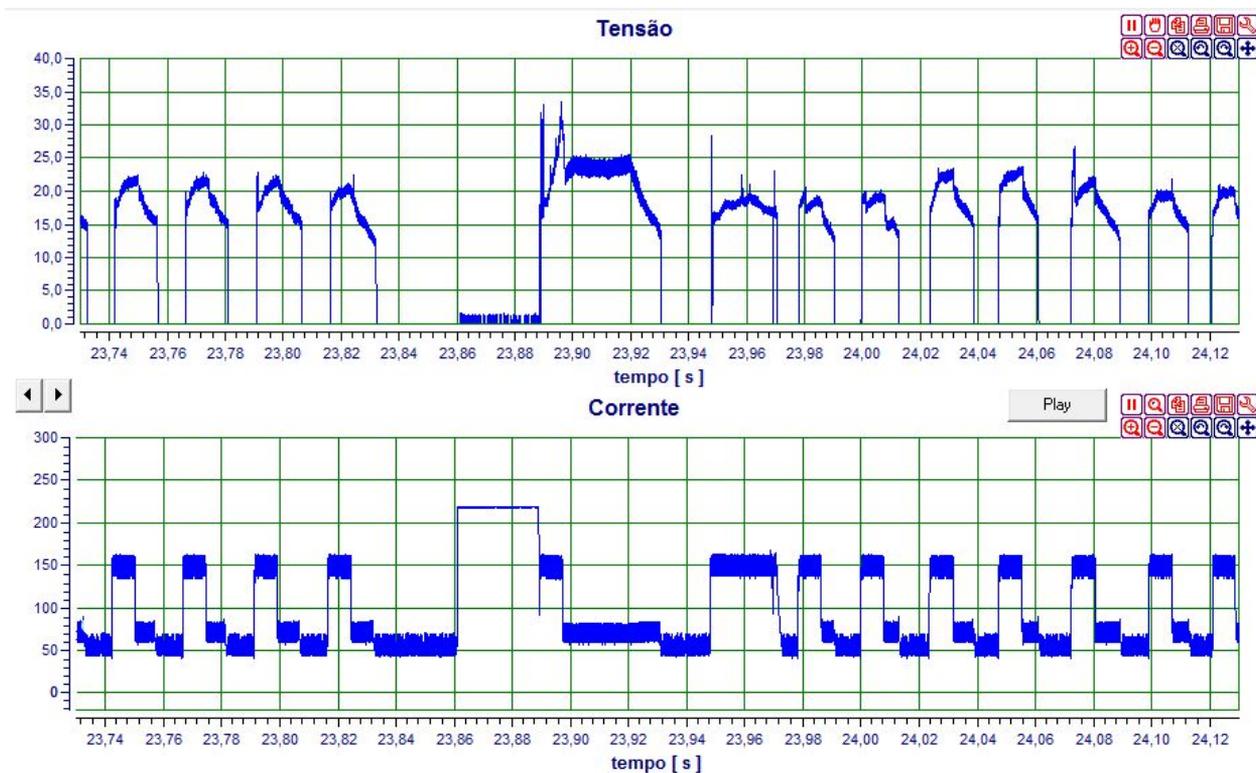


Figura 42 - Proteção no controle para descolar arame da peça.

6.4. Cordões de Solda

No intuito de avaliar o sistema como um todo foram realizados ensaios de soldagem utilizando o protótipo de alimentação dinâmica. Os depósitos obtidos podem ser vistos nas Figuras 43, 44, 45 e 47.



Figura 43 - Cordão nº1, arame de alumínio ER4043, com 1,2 mm de diâmetro, controle PWM.



Figura 44 - Cordão n°2, arame de alumínio ER4043, com 1,2 mm de diâmetro, controle valores extremos.

Os cordões de número 1 e 2 (Figura 42 e 43, respectivamente) foram obtidos com os mesmos parâmetros de entrada. O objetivo deste ensaio foi a comparação do resultado com os diferentes modos de controle. Na Tabela 3 foram reunidos os dados quantitativos a respeito dos cordões aqui exibidos. Analisando a tabela pode-se perceber que com o controle por valores extremos o resultado da alimentação foi mais eficiente, obtendo maiores frequências e maior velocidade de arame.

A Figura 44 mostra o resultado do processo na soldagem de uma liga de aço. Para realizar este ensaio modificou-se a forma de onda original, adicionando um pulso de duração predeterminada pelo usuário durante a etapa de curto. Esse pulso foi implementado, em princípio, seguindo o equipamento CMT de referência (Fronius). A forma de onda nesta situação pode ser observada no oscilograma da Figura 46, obtida na execução do depósito do cordão número 3.



Figura 45 - Cordão n°3, arame de aço ER70S-6, com 1,2 mm de diâmetro, controle valores extremos.

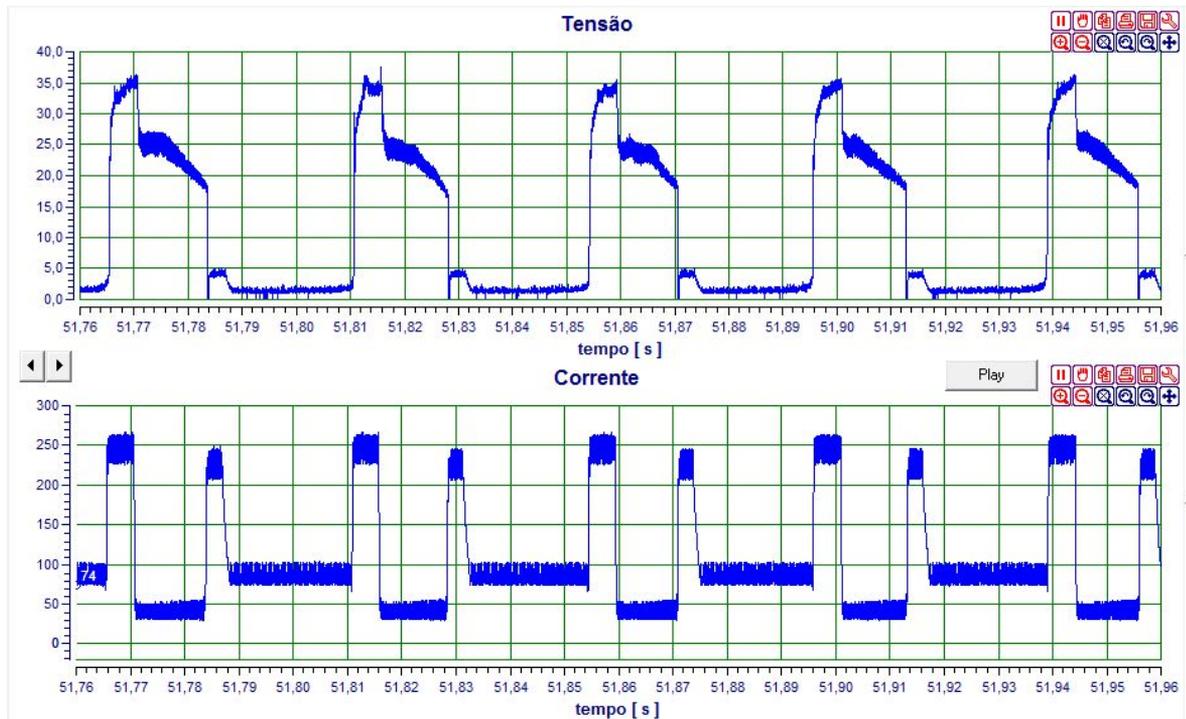


Figura 46 - Oscilograma com o pulso adicional na etapa de curto.



Figura 47 - Cordão nº4, arame de alumínio ER5183, com 1,2 mm de diâmetro, controle valores extremos.

Para o cálculo da velocidade de arame (V_a) indicada na Tabela 3, utilizou-se uma relação aproximada entre os valores de entrada para velocidade de avanço e velocidade de recuo. Por meio do cálculo das médias de tempo em cada uma das três etapas (pulso, base e curto), foi estabelecida uma relação da forma:

$$d = V_{av} \cdot (t_p + t_b) - V_{re} \cdot (t_c)$$

sendo "d" o deslocamento, " V_{av} " e " V_{re} " as velocidades de avanço e recuo, respectivamente, " t_p ", " t_b " e " t_c " os tempos médios de pulso, base e curto. A partir do

deslocamento calculado com a equação acima, obtêm-se a velocidade de arame dividindo pelo período total médio do ciclo do processo.

Tabela 3 - Grandezas envolvidas na soldagem para os diferentes cordões de solda.

nº	Controle fonte	Arame	Material base	Valores de Entrada								Valores de saída				
				VaR	VrR	Correntes (A)				Tempos (ms)		Valores médios				
						Ip	Ib	Ipb	Icc	tap	tpb	Corrente (A)	Tensão arco (V)	Vel. Arame (m/min)	Potência (W)	Frequência (Hz)
1	PWM	ER4043	Alumínio	900	450	150	70	0	50	8	0	86	11.3	5.87	971.8	37.88
2	val. extremos	ER4043	Alumínio	900	450	150	70	0	50	8	0	90	11.5	8.05	1035	41.70
3	val. extremos	ER70S-6	Aço	1300	1300	250	40	220	80	5	3	106	11.3	3.64	1197.8	24.58
4	val. extremos	ER5183	Alumínio	900	450	130	60	0	30	8	0	71	11.4	7.00	809.4	39.67

6.5. Detalhamento da Transferência Metálica

Uma vez que a transferência metálica para esse processo ocorre em níveis de frequência relativamente altos, é impossível o acompanhamento das etapas a olho nu. Assim, é necessário utilizar o recurso da filmagem em alta velocidade para uma melhor análise do funcionamento do protótipo construído, assim como para validação da estratégia de controle desenvolvida.

Na Figura 48 são apresentadas algumas imagens da região de contato do arame com a peça obtidas com a filmagem de alta velocidade. A imagem “A” marca o início de um ciclo de operação do processo na fase de pulso, onde pode-se observar o arco elétrico em evidência. Já na imagem “B” o arame se aproxima da peça com a gota formada em sua extremidade. A imagem “C” mostra o instante da ocorrência do curto-circuito, permanecendo nessa fase até a imagem “E”, onde o arame é recuado e vê-se a ponte metálica prestes a se romper. Por fim, na imagem “F” observa-se a reabertura do arco elétrico e o reinício do ciclo.

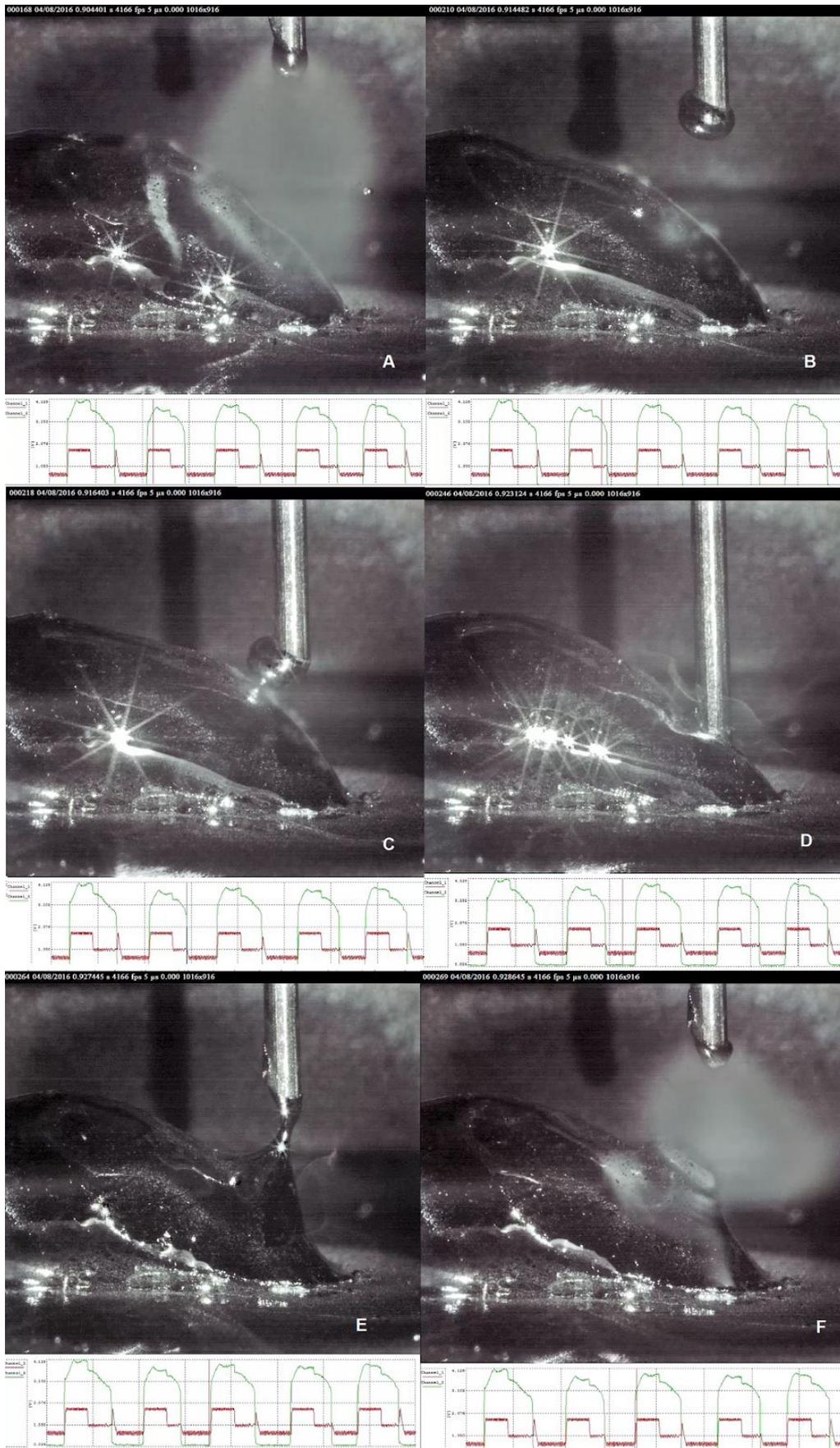


Figura 48 - Detalhamento da transferência metálica.

Capítulo 7: Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros

Através da análise dos dados obtidos nos ensaios pode-se concluir sobre a aplicabilidade da técnica de alimentação dinâmica de arame. Os resultados mostrados nas figuras 43, 44, 45 e 46 mostraram-se promissores e alguns comentários adicionais podem ser levantados.

A soldagem utilizando a liga de alumínio ER4043 se mostrou trabalhosa devido ao fato de que o arame utilizado é bastante maleável. Isso gerou falhas em diversas ocasiões causadas pela dobra de arame no sistema de tracionamento, principalmente. Na ocorrência da dobra de arame, seu deslocamento pelo rolete fica comprometido, o que impossibilita a realização de ensaios. Ainda sobre os ensaios dessa liga, notou-se que os níveis de energia estavam bastante elevados, o que prejudicou a qualidade final e uniformidade do cordão de solda.

A liga de alumínio ER5183 apresentou melhores resultados principalmente com relação à razão potência/velocidade de arame. Utilizando baixos níveis de energia foi possível obter uma boa velocidade média de alimentação de arame, como pode ser analisado na Tabela 3.

Sobre os ensaios realizados com ligas de aço pode-se comentar sobre a dificuldade de alimentar o arame pelo acionamento da tocha. Isso se deve pelo maior peso do arame e a dificuldade associada à fusão do mesmo. Nestes ensaios a frequência máxima que se obteve foi bastante reduzida se comparada aos ensaios com o alumínio, aproximadamente 25 Hz no aço e 40 Hz utilizando ligas de alumínio.

Finalizando, pode-se destacar o gargalo do processo: a dinâmica do acionamento. Em ensaios realizados verificou-se que o mesmo demorava pouco mais de 3 ms para realizar a inversão de sentido. O fator temporal é algo fundamental para este sistema e esperava-se que a troca de sentido de rotação do motor fosse efetuada de forma mais rápida. Este fato também reflete na altura do arco elétrico, afinal uma vez que o arame é retraído mais que o necessário em cada

reabertura de arco, o seu comprimento também sempre será maior que o necessário. Este limitante pode ser observado pelo gráfico da Figura 49, que se trata da curva de velocidade e torque do motor em operação durante um ensaio de soldagem. Pode-se perceber que o motor não consegue atingir seu valor de regime permanente em nenhum momento do seu ciclo.

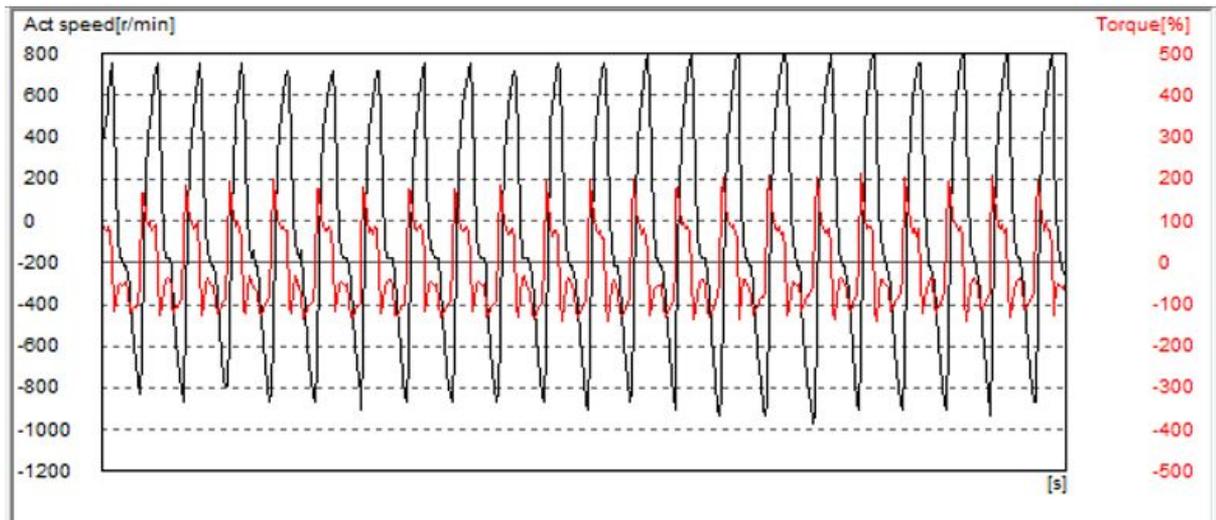


Figura 49 - Velocidade e torque do servomotor durante operação.

Então, como sugestão para trabalhos futuros, pode-se citar o uso de outro motor de dinâmicas mais rápidas, com características construtivas que viabilize a operação em altas velocidades e inversões mais rápidas de sentido. Outra sugestão é a construção de uma tocha de soldagem com o servomotor integrado ao corpo da mesma, beneficiando do melhor acoplamento mecânico das partes envolvidas no sistema de alimentação dinâmica.

Bibliografia

- [1] YOUNAS, M. Malik. “Understanding Welding Methods for the Oil & Gas Industry”, 2012.
- [2] SARTORI, Francisco. “Desenvolvimento de Tecnologia de Soldagem Orbital MIG/MAG para Tubos de Parede Espessa”, 2014.
- [3] SCOTTI, Américo. “Soldagem MIG/MAG melhor entendimento, melhor desempenho”.
- [4] Apostila de Soldagem MIG/MAG, ESAB Company.
- [5] GOHR, Raul Jr. “Novos Métodos de Controle da Soldagem MIG/MAG”, 2002.
- [6] DUTRA, J. C; SILVA, R. H. G.”MIG/MAG - Transferência Metálica por Curto-Circuito sob Controle da Forma de Onda da Corrente – Sistemas CCC e STT- Fundamentos”, 2008.
- [7] SILVA, R. H.G. “Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-circuito Controlado Aplicada ao Passe de Raiz“, 2005.
- [8] LINCOLN ELECTRIC, “*Waveform Control Technology Surface Tension Transfer (STT)*”
- [9] MARQUES, C. “Prospecções da Natureza Física da Soldagem MIG Automática de Ligas de Alumínio”, 2013.
- [10] FRONIUS, “The new revolution in digital GMA welding”
- [11] KAZMAIER, J. “CMT Advanced Technology - An Arc Process Revolution”. Fronius International GMBH. Wels-Thalheim, Austria, 2010.
- [12] EVANS, J. “Cold Metal Transfer - Robotics”. Fronius UK
- [13] MORELATO, A. L. França. “Motores Elétricos de Corrente Contínua e Universal”, 2001.
- [14] GOLÇALVES, F. B; PUGA, V. A.S. “Motor de passo”, 2008.

- [15] MIGUEL, N. R. M. “Análise do Funcionamento de um Servomotor de Corrente Alternada com Ímãs Permanentes”, 2012.
- [16] PANASONIC, datasheet
industrial.panasonic.com/content/data/MT/PDF/catalog/en/acs/minas-a5-2_ctlg_e_201504.pdf
- [17] PANASONIC, “ Instruction Manual AC Servo Motor and Driver MINAS A4 Series”.
- [18] IMC soldagem, disponível em: www.imc-soldagem.com.br/digiplus.html
- [19] LABSOLDA, disponível em:
www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_viabilizados/tartilope_v2.php
- [20] IMC soldagem, disponível em:www.imc-soldagem.com.br/sap_4.html
- [21] IMC soldagem, disponível em:
http://www.imc-soldagem.com.br/larry_flex.html
- [22] IDT Vision, disponível em:
<https://www.idtvision.com/products/cameras/y-series-cameras/>